



Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Engenharia Elétrica e informática  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

# Sistema de Localização Baseado em Redes de Sensores Sem Fio

José Maurício Ramos de Souza Neto

Dissertação de Mestrado

Campina Grande

7 de Abril de 2010

Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Engenharia Elétrica e informática  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

José Maurício Ramos de Souza Neto

# Sistema de Localização Baseado em Redes de Sensores Sem Fio

*Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande - Campus de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em ciências no Domínio de Engenharia Elétrica.*

Área de concentração: Instrumentação eletrônica

*José Sérgio da Rocha Neto*

Orientador

*Ian Andrew Glover*

Orientador

Campina Grande , Paraíba, Brasil

©José Maurício Ramos de Souza Neto, 7 de Abril de 2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S729s

2010 Souza Neto, José Maurício Ramos de.

Sistema de localização baseado em redes de sensores sem fio / José Maurício Ramos de Souza Neto. — Campina Grande, 2010.  
75f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.

Referências.

Orientadores: Prof. Dr. José Sérgio da Rocha Neto, Prof. Dr. Ian Andrew Glover.

1. Perdas de Transmissão. 2. Estimção de Localização. 3. Nível de Sinal Recebido. 4. Trilateração. I. Título.

CDU – 621.391.812(043)

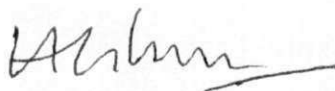
**SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO BASEADO EM REDES DE SENSORES SEM FIO**

**JOSÉ MAURÍCIO RAMOS DE SOUZA NETO**

Dissertação Aprovada em 12.03.2010



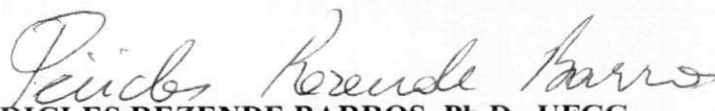
**JOSÉ SÉRGIO DA ROCHA NETO, D.Sc., UFCG**  
Orientador



**IAN ANDREW GLOVER, Dr., Visitante – DEE**  
Orientador



**BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG**  
Componente da Banca



**PÉRICLES REZENDE BARROS, Ph.D., UFCG**  
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB  
MARÇO - 2010

*A minha mãe e tia, Terezinha Ramos de Souza e Severina Ramos de Souza, pelas angústias e preocupações que passavam por minha causa, por terem dedicado parte de suas vidas a mim, pelo amor, carinho e estímulo que me ofereceram e pelo exemplo de vida, dedico-lhes esta conquista como gratidão, por sempre estarem presentes nos momentos mais difíceis, colaboradoras e incentivadoras, minhas grandes fontes de alegria.*

# *Resumo*

Neste projeto de pesquisa concebeu-se um sistema de estimação de localização, onde pode ser visualizado de forma simples, a atual posição do nó rastreado para aplicações estáticas. Para conceber o sistema, foi utilizada uma rede de sensores sem fio baseada no padrão IEEE 802.15.4, que nos fornece um acompanhamento do nível de sinal recebido por um dado nó na rede. Esta informação é utilizada como entrada num modelo que infere a distância entre os nós, que por sua vez é aplicada a um algoritmo de estimação de localização baseado em trilateração. O sistema se mostra eficaz e compatível com aplicações de baixa área de cobertura, comparada com sistemas de posicionamento globais.

***Palavra-chave:*** *Estimação de Localização, Perdas de Transmissão, Nível de Sinal Recebido, Trilateração.*

# *Abstract*

In this research project was conceived a system of estimation of location, where it can be viewed in a simple way, the current position of node screened for applications static. To conceive the system, was used a sensor wireless network based on IEEE 802.15.4 standard, which provides us a monitoring of the received signal strength by a given node in the network. This information is used as an entry in a model which implies the distance between the nodes, which in turn is applied to an algorithm for location estimation based on trilateration. The system is effective and consistent with applications of low area of coverage, compared with global positioning systems.

**keywords:** *Location Estimation, Transmission Loss, Received Signal Strength, Trilateration.*

# *Agradecimentos*

- À Deus que é Esperança, Piedade e Misericórdia, a Verdadeira Força, que nos faz e nos dá tudo que temos e somos;
- A minha mãe Terezinha Ramos de Souza, grande timoneira que sempre me guia pelas águas tranquilas do amor proporcionando-me carinho, otimismo, perseverança e honestidade, a quem sem dúvida alguma, devo tudo que tenho e sou;
- Aos meus grandes amigos e os conquistados no Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle e a tantos outros, pelo apoio, incentivo e sobretudo, por estarem sempre presentes diante da menor solicitação de suas presenças;
- Aos meus orientadores José Sérgio da Rocha Neto e Ian Andrew Glover pela paciência que sempre souberam me encaminhar nos estudos;
- A Universidade Federal de Campina Grande - UFCG por terem me dado esta oportunidade e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES.



# Conteúdo

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Abreviaturas p. 11

**1 Introdução** p. 13

1.1 O Esquema de Sinalização . . . . . p. 14

1.2 Parâmetros Relacionados a Posição . . . . . p. 15

1.3 Localização *Indoor* vs *Outdoor* . . . . . p. 15

**2 Redes de Sensores sem Fio** p. 16

2.1 O Padrão 802.15.4 para Redes de Sensores Sem Fio . . . . . p. 19

2.1.1 Os Dispositivos da Rede . . . . . p. 19

2.1.2 Topologias de Rede . . . . . p. 20

2.1.2.1 A Topologia em Estrela . . . . . p. 21

2.1.2.2 A Topologia Ponto-a-Ponto . . . . . p. 21

2.1.2.3 A Topologia em Árvore . . . . . p. 22

2.1.3 IEEE 802.15.4 - Camada Física (PHY) . . . . . p. 24

2.1.4 IEEE 802.15.4 - Camada de Controle de Acesso ao Meio (MAC) p. 26

2.2 A Tecnologia ZigBee . . . . . p. 27

2.3 O Transceptor ZigBee/IEEE 802.15.4 . . . . . p. 28

2.3.1 As Primitivas de Comunicação entre as camadas . . . . . p. 30

2.4	Conclusão . . . . .	p. 31
<b>3</b>	<b>Propagação do Sinal sem Fio</b>	p. 32
3.1	Metodologia para caracterização do ambiente . . . . .	p. 32
3.2	O modelo físico de propagação . . . . .	p. 37
3.3	Estudo de Caso - Caracterização de um ambiente de vegetação rasteira em Patos . . . . .	p. 39
3.3.1	Resultados . . . . .	p. 41
<b>4</b>	<b>Sistemas de Localização</b>	p. 44
4.1	Introdução . . . . .	p. 44
4.2	Algoritmos de Localização Baseados em RSS . . . . .	p. 46
4.2.1	Estimação de Distância Usando RSSI . . . . .	p. 46
4.2.2	A Estimação de Localização Baseada em RSSI Usando Triangulação	p. 47
4.2.3	Fontes de Erro em Estimação de Localização baseada em RSSI .	p. 53
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	p. 56
5.1	Modelo de propagação sem fio - Resultados . . . . .	p. 56
5.2	Algoritmo de Estimação de Localização - Resultados . . . . .	p. 59
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	p. 69
	<b>Referências</b>	p. 72

## *Lista de Figuras*

1	Exemplo de uma Rede de Sensores Sem Fio. . . . .	p. 16
2	Representação da arquitetura da pilha com ZigBee/802.15.4 . . . . .	p. 20
3	Representação do modelo de uma topologia em estrela. . . . .	p. 21
4	Representação do modelo de uma topologia ponto-a-ponto. . . . .	p. 22
5	Representação do modelo de uma topologia em árvore. . . . .	p. 23
6	Representação do modelo de banda para os canais no padrão 802.15.4. . . . .	p. 24
7	Diagrama descritivo dos modos de operação. . . . .	p. 27
8	Módulo transceptor usado no sistema. . . . .	p. 29
9	Diagrama da estrutura interna do módulo XBee/XBee-PRO. . . . .	p. 29
10	Circuito elétrico do módulo XBee. . . . .	p. 29
11	Diagrama de Blocos do sistema. . . . .	p. 30
12	Área de medição. . . . .	p. 33
13	Diagrama esquemático da área de medição. . . . .	p. 33
14	Nível teórico de sinal recebido para para o cenário experimentado. . . . .	p. 35
15	Barra de medição com multiplos nós, para caracterização do ambiente. . . . .	p. 35
16	Conjunto de dados obtidos no experimento de campo, sem procesamento. . . . .	p. 36
17	Conjunto de dados obtidos no experimento de campo, após rotina de processamento inicial. . . . .	p. 37
18	Modelo de propagação dos dois raios. . . . .	p. 37
19	Diagrama esquemático do local das medições. . . . .	p. 39
20	Estrutura montada para o conjunto de nós transmissores. . . . .	p. 40

21	Comparação para o modelo Físico com $\varepsilon_R = 15$ e $\sigma = 0,2$ , $s = 3$ cm . . .	p. 41
22	Comparação para o modelo Físico utilizando otimização de <i>off-set</i> . . . .	p. 42
23	Comparação para o modelo Físico extendido com $\varepsilon_R = 18,33$ e $\sigma = 7,25$ , $s = 3$ cm . . . . .	p. 43
24	Curva de decaimento do sinal no ambiente com escala normal. . . . .	p. 47
25	Curva de decaimento do sinal no ambiente com escala logarítmica. . . .	p. 48
26	Estimação de localização usando triangulação (a) Caso ideal e (b) Com escala de estimação de erro. . . . .	p. 49
27	Sistema de estimação de localização simplificado. . . . .	p. 51
28	Fluxograma da rotina completa para estimação de localização. . . . .	p. 53
29	Comparação entre os dados obtidos e o modelo Físico seguindo as reco- mendações do ITU-R ( $\varepsilon_R = 20$ e $\sigma = 0,6$ S/m) . . . . .	p. 57
30	Comparação entre os dados obtidos e o modelo Físico seguindo as reco- mendações do ITU-R com a adição do <i>off-set</i> de correção ( $\varepsilon_R = 20$ e $\sigma = 0,6$ ) . . . . .	p. 58
31	Comparação entre os dados obtidos e o modelo Físico com a adição dos <i>off-sets</i> de correção e a otimização dos parâmetros elétricos do meio ( $\varepsilon_R =$ $1,0337$ e $\sigma = -0,9794$ S/m) . . . . .	p. 59
32	Diagrama da área de medição para obtenção do conjunto “A” de medições.	p. 60
33	Comparação dos resultados para o Ponto 1. . . . .	p. 63
34	Comparação dos resultados para o Ponto 2. . . . .	p. 64
35	Comparação dos resultados para o Ponto 3. . . . .	p. 65
36	Comparação dos resultados para o Ponto 4. . . . .	p. 66
37	Comparação dos resultados para o Ponto 5. . . . .	p. 67
38	Comparação dos resultados para o Ponto 6. . . . .	p. 68

## *Lista de Tabelas*

1	Comparativo das tecnologias de RSSF. . . . .	p. 17
2	Bandas de frequências e taxas de dados. . . . .	p. 24
3	Expoente de perdas no caminho para diferentes ambientes . . . . .	p. 48
5	Posicionamento real dos nós. . . . .	p. 60
6	Posição estimada dos pontos usando a máxima potência de transmissão.	p. 61
7	Posição estimada dos pontos usando a mínima potência de transmissão.	p. 62

## *Lista de Abreviaturas*

AoA	Angle of Arrival .....	p. 45
ASP	Application Support Package .....	p. 31
CCA	Clear channel Assessment .....	p. 25
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access / Contention Avoidance .....	p. 26
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum .....	p. 54
ED	Energy Detection .....	p. 25
FFD	Full Function Device .....	p. 19
GPRS	General Packet Radio Service .....	p. 18
GPS	Global Positioning System .....	p. 44
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers .....	p. 18
ISM	Industrial Scientific and Medical .....	p. 27
LOS	Line Of Sight - Linha de visão .....	p. 14
LOS	Line of Sight .....	p. 47
LPS	Local Positioning System .....	p. 44
LQI	Link Quality Indicator .....	p. 46
LQI	Link quality Indicator .....	p. 25
LR-WPAN	Low-Rate Wireless Private Area Networks .....	p. 19
MAC	Medium Access Control .....	p. 19
MCPS	MAC Common Part Sublayer - Service Access Point .....	p. 30

MLME MAC SubLayer Management Entity .....	p. 30
NLOS Non Line Of Sight - Sem linha de visão .....	p. 15
PAN Personal Area Network .....	p. 19
PDA Personal Digital Assistants .....	p. 18
PHY Physical Layer .....	p. 19
RF Radio Frequency .....	p. 14
RFD Reduced Function Device .....	p. 20
RSSF Redes de Sensores Sem Fio .....	p. 13
ToA Time of Arrival .....	p. 45
UFMG Universidade Federal de Campina Grande .....	p. 32
UWB Ultra Wideband .....	p. 45
WLAN Wireless Local Area Network .....	p. 18
WPAN Wireless Personal Area Network .....	p. 18

# 1 *Introdução*

Comunicações sem fios estão se tornando uma parte integrante de nossas vidas diárias. Comunicações por satélite, redes celulares, redes locais sem fios e redes de sensores sem fios são só alguns das tecnologias sem fios que nós usamos diariamente. Eles fazem nossas vidas diárias mais fáceis nos mantendo conectados em qualquer lugar, a qualquer hora.

Localização é um importante aspecto no campo de Redes de Sensores sem Fio (RSSF) que tem atraído significativo interesse em pesquisa recentemente. Espera-se um crescimento ainda maior no interesse em aplicação de sistemas de localização em RSSF com a expansão das técnicas de comunicação sem fio e técnicas de monitoramento, e consequentemente a proliferação de aplicações com tal tecnologia. O uso de redes de sensores distribuídos vem sendo discutida por mais de 30 anos, mas a visão de RSSF foi trazida à realidade recentemente com o avanço em comunicação sem fio e na eletrônica, os quais têm habilitado o desenvolvimento de aplicações com baixo custo, baixo consumo e utilizando sensores multifuncionais que são pequenos em tamanho e comunicam-se sobre curtas distâncias [1].

Um dispositivo sem fios pode usar a informação de localização de modos diferentes para tecnologias diferentes. Por exemplo, em redes de celulares, a informação de localização pode ser usada para serviços de emergência, descoberta de fraude, administração de recursos e sistemas de transporte inteligentes [2]. Localização de médicos/pacientes em hospitais, esquiadores feridos em montanhas ou vítimas dentro de um edifício em chamas são alguns exemplos de como pode ser usada informação de localização para economizar vidas em situações de emergência [3].

A literatura no contexto de localização previamente apresentada classificações diferentes de tecnologias de localização [4], [5], dentre elas, algumas das classificações importantes são brevemente discutidas.

Objetiva-se ao final deste trabalho obter um sistema de monitoramento associado a



uma *interface* num computador, onde possa ser visualizado, de forma simples, a atual posição do nó rastreado para aplicações estáticas.

Este documento está dividido em 6 capítulos, no próximo capítulo realiza-se uma descrição sobre redes de sensores sem fio com um enfoque principal sobre a tecnologia ZigBee, escolhida como solução para o problema proposto, além das características principais do módulo utilizado e as principais informações sobre o padrão IEEE 802.15.4. No terceiro capítulo, realiza-se uma descrição mais detalhada sobre o modelo de propagação do sinal sem fio e o conjunto de medições realizado para essa modelagem. O quarto capítulo possui uma breve descrição dos principais métodos de estimação de localização aplicados a redes de curta distância, onde, vale salientar o uso de algoritmos de baixa complexidade computacional e de *hardware*. O quinto capítulo engloba as informações referentes aos resultados dos conjuntos de experimentos realizados e o processo de estimação de localização. Por fim, o sexto capítulo é referente às conclusões obtidas a partir da implementação deste sistema como forma de aplicação de uma rede de sensores sem fio para aplicações em sistemas de localização.

## 1.1 O Esquema de Sinalização

Uma classificação fundamental está baseado no esquema de sinalização que uma de tecnologia de localização usa. Um *link* de Rádio Frequência (*Radio Frequency*) é o esquema de sinalização geralmente usado para propósitos de localização. Isto é porque sinais de RF podem penetrar obstáculos e podem se propagar a longas distâncias.

Sinais infravermelhos são de baixa potência e baratos; porém, eles não podem penetrar por obstruções (ao invés de RF) e eles são susceptíveis à luz solar. Então, as aplicações normalmente precisam ter instalados sensores infravermelhos por toda parte do ambiente fechado para apanhar os sinais de um transmissor.

Sinais ópticos também requerem condições de linha-de-visão (LOS), são afetado através de luz solar e requerem baixa potência. Provêm sistemas de precisão alta e são tipicamente mais apropriados para aplicações de curtas distâncias (por exemplo, ao redor de 10 m).

Outra alternativa de sinalização barata é a utilização de sinais de ultra-som que em curtas distâncias são mais precisos. Uma vantagem de sinais acústicos é que o som viaja lentamente. Conseqüentemente, relógios lentos possuem precisão suficiente e alta.

Por outro lado, emissores acústicos não trabalham bem em ambientes sem-linha-de-visão (NLOS) [3].

## 1.2 Parâmetros Relacionados a Posição

Sistemas de localização podem empregar vários parâmetros/informação obtidos de um sinal recebido, como o tempo-de-chegada (TOA), diferença de tempo de chegada (TDOA), ângulo de chegada (AOA), e nível de sinal recebido (RSS). Aproximações híbridas que usam combinações dos anteriores também são possíveis[3].

## 1.3 Localização *Indoor* vs *Outdoor*

Devido a diferenças significantes nas características de propagação dos ambientes, é comum a classificação os sistemas de localização como sistemas de localização em recinto fechado e ao ar livre.

Um exemplo típico de um sistema de localização ao ar livre é o GPS. Usa informação de TDOA de quatro ou mais de 24 satélites ao redor do mundo, calcula a posição de objetivo com uma precisão entre 1 e 5 m. Executa pobremente em lugares fechado visto que edifícios bloqueiam sinais de GPS. Outro sistema de localização ao ar livre extensamente usado é o E911 aplicado a redes de celulares.

Embora GPS e sistemas de E911 podem prover informação de localização ao ar livre, eles não são projetados para os ambientes em recinto fechado onde desafios técnicos mais complexos existem e exigências de precisão são tipicamente muito mais altas. Sistemas de localização em recinto fechado podem requerer uma infra-estrutura completamente diferente instalada dentro de edifícios (por exemplo, distintivos ativos[4]) ou eles podem confiar na infra-estrutura de comunicações existente como LANs sem fios (por exemplo, RADAR por Pesquisa da *Microsoft* [6]) [3].

## 2 *Redes de Sensores sem Fio*

Redes de sensores sem fios (RSSF) têm recebido considerável atenção nos últimos alguns anos, uma vez que podem potencialmente beneficiar uma variedade de áreas científicas, militares, e aplicações comerciais. Estas redes consistem de um conjunto de nós sensores comunicando-se via um *link* de RF e cada um pode incorporar um ou mais sensores. Estes nós podem ser simples, bastando tomar medidas básicas, ou eles podem ser complexos, contendo um grande volume de dados e informações [7].

Esses nós podem ser colocados dentro do fenômeno a ser analisado ou próximo a ele, diferentemente das redes de sensores tradicionais. As posições de cada nó podem ou não ser pré-determinadas ou pré-calculadas, podendo ser aleatórias, visto que a implantação de redes de sensores em locais de difícil acesso pode ocorrer pelo uso de transporte aéreo, apenas “soltando” os nós sobre a região a ser analisada (*Smart dust*) [8]. A comunicação entre estes nós é feita através de uma rede *ad-hoc* sem fio, um nó transmitindo a outro nó próximo os valores do sensoriamento. Este próximo nó deve se encarregar de passar os dados para o próximo nó, e assim por diante (Figura 1). Objetiva-se obter dispositivos tão pequenos e (espera-se) baratos que possam ser usados em larga escala.

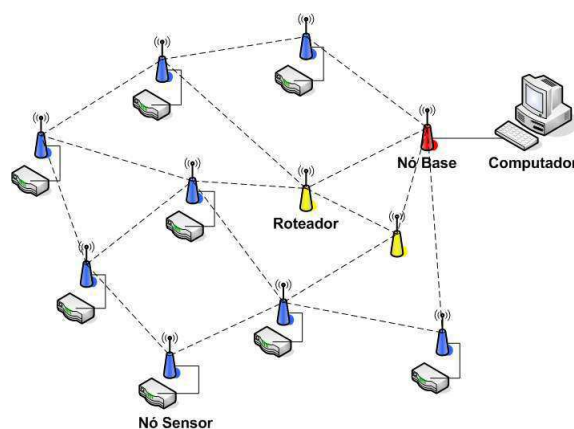


Figura 1: Exemplo de uma Rede de Sensores Sem Fio.

As RSSF têm características que as diferem bastante das redes mais comuns. Uma

característica das RSSF é que são centradas em dados, diferente das redes tradicionais centradas em endereço. Assim, um nó difunde (ou pede) informações baseadas em atributos. Além disso, os nós-sensores devem atender a requisitos específicos da aplicação, muito comumente os nós focam-se em apenas um atributo, ou um pequeno conjunto de atributos, necessitando então de processamento no interior da rede. As restrições impostas à rede de sensores sem fio implicam em uma série de requisitos para os protocolos de comunicação nunca antes encontrados em tal escala. Como consequência de suas características, os protocolos de comunicação e gerenciamento da rede devem ter capacidades de auto-organização.

A tecnologia de comunicação sem fio a ser usada pode ser escolhida entre várias opções, como GPRS, Wi-Fi, Bluetooth, e ZigBee. Na Tabela 1 podemos observar um comparativo dessas tecnologias [9].

Tabela 1: Comparativo das tecnologias de RSSF.

	<b>ZigBee 802.15.4</b>	<b>Bluetooth 802.15.1</b>	<b>Wi-Fi 802.11b</b>	<b>GPRS/GSM 1XRTT/CDMA</b>
<b>Tamanho da pilha</b>	4-28 KB	250 KB+	1 MB	16 MB
<b>Duração da Bateria (Dias)</b>	100 – 1,000	1 – 7	0.1 – 5	1 – 7
<b>Nós Por Rede</b>	255/65,000	7	30	1 – 1000
<b>Taxa de Transmissão(KBps)</b>	20-250	720	11	64 – 128
<b>Distância (Metros)</b>	1 – 1600	1 – 10	1 – 100	1000
<b>Foco de Aplicação</b>	Monitoramento e Controle	Realocação de Cabos	Web, e-mail e vídeo	Dados e Voz Sem Fio
<b>Pontos Positivos</b>	Confiabilidade, Rede Segura  Simplicidade do Protocolo  Baixo Consumo de Energia	Baixo Custo Incremental  Uso Fácil/Conveniência  Taxa Moderada de Dados	Alta Transmissão de Dados  Flexibilidade (Trabalho e Casa)  Conectividade <i>Hot Spot</i>	Ampla Cobertura Geográfica  Desenvolvimento de Rede

A tecnologia Bluetooth possui especificação aberta para dispositivos baseados em

radio frequência, curtas distâncias com uma tecnologia de conectividade que promete mudar a face da computação e comunicação sem fio. Foi desenvolvido para ser uma alternativa de baixo custo, uma rede de para todas as classes de dispositivos portáteis, tais como *laptops*, PDAs (*Personal Digital Assistants*), e telefones móveis [10].

Um sistema usando Wi-Fi (802.11) é um sistema de transmissão de dados projetado para assegurar uma conexão que não depende do local dos periféricos e que usa uma infraestrutura de ligações sem fios em lugar de uma cabeada, formando assim as chamadas WLANs (*Wireless Local Area Network*). O *Institute of Electrical and Electronics Engineers* - IEEE ratificaram a especificação do 802.11 em 1997. Este padrão, em sua primeira versão, possuía taxas de dados de 1 e 2 Mbps e definia as regras fundamentais para sinalizar serviços sem fios. O problema principal que limitou o desenvolvimento industrial inicial de WLANs era então o processamento limitado dos computadores que faziam uso dessa rede [11].

A primeira atualização notável para caracterizar a evolução de comunicações celulares foi pela introdução do Serviço de Rádio de Pacote Geral (ou GPRS - *General Packet Radio Service*). Com esta introdução a comunidade de telecomunicações reconheceu que havia-se alcançado um passo significativo na balança de geração evolutiva de celulares. São transmitidos pacotes de dados usando *slots* de tempo que estão livremente disponíveis, embora em realidade GPRS define um jogo de classes que designam numerosos esquemas de transmissão. Um esquema de classe particular reservará *slots* de tempo para *upload* e *download* de forma diferente [12].

Dentre as Redes WPAN (*Wireless Personal Area Network*) existentes, a mais recente e promissora é a que usa o padrão ZigBee IEEE 802.15.4. A ZigBee Alliance é quem desenvolve o padrão ZigBee junto ao IEEE, através da associação de várias empresas, que juntas, trabalham em conjunto para proporcionar e desenvolver tecnologias para criar um padrão de baixo consumo de energia, baixo custo, segurança, confiabilidade, e com funcionamento em rede sem fios baseado em uma norma aberta global. Atualmente a ZigBee Alliance está incluindo novos e mais abrangentes recursos, possibilitando que os fabricantes aumentem significativamente a capacidade da ZigBee, fazendo com que sua posição de liderança continue firme e crescente no mercado de redes para controle de dispositivos sem fio. Há hoje, mais de 300 empresas associadas a ZigBee Alliance em vários países e com um crescimento expansivo. O ZigBee permite comunicações robustas e oferecem uma excelente imunidade contra interferências, e a capacidade de hospedar

milhares de dispositivos numa Rede (em torno de 65.000), com taxas de transferências de dados variando entre 20Kbps a 250Kbps. O Protocolo ZigBee é destinado a aplicações industriais, portanto, o fator velocidade não deve ser crítico numa implementação ZigBee. Os módulos RF padrão ZigBee foram criados para economizar ao máximo energia. Com isso, é possível criar dispositivos sensores remotos alimentados com pilhas ou baterias comuns, que durarão meses ou mesmo anos sem precisarem ser substituídas. Isso porque, os módulos ZigBee quando não estão transmitindo/recebendo dados, entram num estado de dormência ou em *sleep*, consumindo o mínimo de energia [13].

## 2.1 O Padrão 802.15.4 para Redes de Sensores Sem Fio

O protocolo do IEEE 802.15.4 especifica a subcamada de controle de acesso ao meio (*Medium Access Control Layer*- MAC) e a camada física (*Physical Layer* - PHY ) para redes sem fio pessoais privadas de baixas taxas de comunicação, *Low-Rate Wireless Private Area Networks* (LR-WPAN ) [14].

A tecnologia ZigBee incorpora o protocolo IEEE 802.15.4. Na realidade, a *ZigBee Alliance*, o que é uma organização com mais de 150 empresas associadas tem trabalhado em conjunto com o IEEE, a fim de especificar um protocolo completo com pilha de baixo custo, baixo consumo, a baixa taxa de transferência de dados para comunicações sem fio, bem como para promover a sua utilização em todo o mundo. O conjunto de especificações do ZigBee, lançado em dezembro de 2004 e recentemente à disposição do público, especifica camadas superiores de um pilha que possui como base o padrão IEEE 802.15.4, ou seja, a camada de rede (incluindo serviços de segurança) e a camada de aplicação (incluindo o dispositivo, objetos e perfis). Um diagrama da estrutura em camadas representativa da arquitetura ZigBee / IEEE 802.15.4 é apresentado na Figura 2.

### 2.1.1 Os Dispositivos da Rede

De acordo com o padrão IEEE 802.15.4 uma LR-WPAN suporta dois diferentes tipos de dispositivos:

- **Full Function Device (FFD)** : Um FFD é um dispositivo que pode operar em três modos diferentes, servindo como:
  - Um coordenador da PAN : o principal controlador da PAN. Este dispositivo

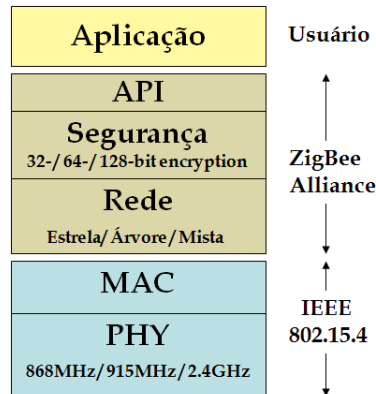


Figura 2: Representação da arquitetura da pilha com ZigBee/802.15.4

identifica a sua própria rede, para que outros dispositivos possam associar-se.

- Um Coordenador: fornece serviços sincronização através da transmissão de sinalizações (*beacons*). Esse coordenador deve estar associada a um coordenador de PAN e não cria sua própria rede.
- Um dispositivo simples: um dispositivo que não implementa as funcionalidades anteriores. funcionando apenas como um ramo final da rede, ou seja um nó de sensoriamento ou atuação.
- **Reduced Function Device (RFD)**: o RFD é um dispositivo operando com o mínimo de execução do protocolo IEEE 802.15.4. Um RFD é destinado a aplicações que são extremamente simples, como o acionamento de um lâmpada ou um sensor passivo infravermelho; eles não têm a necessidade de enviar grandes quantidades de dados e só pode associar com um único FFD de uma só vez.

Uma LR-WPAN deve incluir pelo menos um FFD atuando como um coordenador PAN que providencie a sincronização global dos serviços da a rede e gerencie o potencial dos dispositivos FFDs e RFDs.

### 2.1.2 Topologias de Rede

Dois tipos básicos de topologias de rede estão definidas no padrão IEEE 802.15.4, de acordo com os requerimentos da rede para a aplicação: a topologia em estrela e a topologia ponto-a-ponto. Um terceiro tipo de topologia, em árvore, pode ser considerada como um caso particular da topologia ponto-a-ponto.

### 2.1.2.1 A Topologia em Estrela

Na topologia em estrela (Figura 3), um único nó opera como um coordenador PAN. Por exemplo, se ele for ativado um FFD pode estabelecer a sua própria rede e se tornar o seu coordenador PAN. O coordenador PAN escolhe um identificador PAN, que não está sendo usado por qualquer outra rede na esfera de influência, que será usado como identificador da rede.

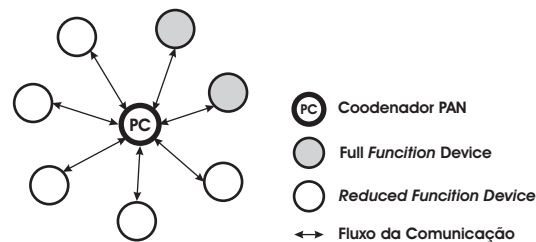


Figura 3: Representação do modelo de uma topologia em estrela.

O paradigma da comunicação na topologia estrela é a comunicação centralizada, ou seja, cada dispositivo (FFD ou RFD) que aderir à rede e dispostos a comunicar com outros dispositivos devem enviar seus dados para o coordenador PAN, que a enviará para os dispositivos de destino adequados.

Devido ao poder de consumo de tarefas do coordenador PAN da topologia em estrela, a norma IEEE 802.15.4 menciona que o PAN coordenador pode ser alimentadas por fontes de tensão comuns ligadas a rede elétrica enquanto outros dispositivos são mais susceptíveis de serem alimentados por baterias.

Como conseqüência, a topologia em estrela parece ser não adequada para redes de sensores sem fio tradicionais, uma vez que todos os nós sensor são supostamente alimentados por baterias, portanto, possuem energia muito condicionada.

Levando em consideração estas questões, a norma do IEEE 802.15.4 recomenda a topologia em estrela para aplicações tais como a domótica, uso em computador pessoal e seus periféricos, brinquedos e jogos.

### 2.1.2.2 A Topologia Ponto-a-Ponto

A topologia ponto-a-ponto também inclui um coordenador PAN, que é nomeado, por exemplo, por ser o primeiro dispositivo de comunicação sobre o canal. No entanto o paradigma da comunicação numa topologia ponto-a-ponto é a comunicação descentralizada,



onde cada dispositivo pode diretamente comunicar-se com qualquer outro dispositivo, no seu conjunto (Figura 4).

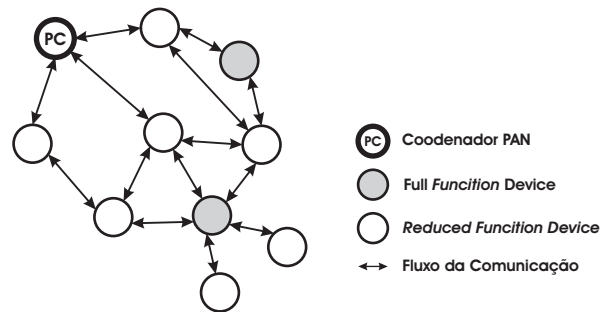


Figura 4: Representação do modelo de uma topologia ponto-a-ponto.

Esta topologia em malha permite reforçar a flexibilidade da rede, mas ela induz a uma complexidade adicional para proporcionar um fim-a-fim entre todos os dispositivos de conectividade a rede. Basicamente, a topologia ponto-a-ponto opera no modo *ad hoc* e permite que múltiplos caminhos a rota dos dados a partir de qualquer dispositivo possam ser estabelecidos até outro dispositivo. No entanto, estas funções devem ser definidas na camada de rede e por isso não são considerados nas especificações do IEEE 802.15.4.

RSSFs é uma das potenciais aplicações que podem se beneficiar de tal topologia. Em contraste com a topologia estrela, o uso de recursos é a mais justa na topologia ponto-a-ponto uma vez que o processo de comunicação não confia em um nó particular.

### 2.1.2.3 A Topologia em Árvore

A topologia em árvore é um caso especial de uma rede ponto-a-ponto na qual a maioria dos dispositivos são FFDs.

- Um (e apenas um) coordenador pode ser nomeado como coordenador PAN, que identifica a rede inteira;
- Qualquer dispositivo FFD pode prover serviços a outros dispositivos ou outros coordenadores;
- Um dispositivo RFD conecta-se a uma árvore por meio de um único dispositivo FFD.

Atualmente o padrão IEEE 802.15.4 não define como construir uma rede com topologia em árvore, ele só indica que é possível e que pode ser inicializada nas camadas mais altas.

O formato da rede pode ser caracterizado como:

- O coordenador PAN:
  - Forma o primeiro “ramo” por estabelecimento de si próprio como o nó principal do grupo, com um identificador CID = 0;
  - Escolhe um identificador da PAN não usado;
  - Envia *Beacons* na forma *Broadcast* para todos os dispositivos na sua vizinhança.
- Um dispositivo recebendo um pacote *beacon* pode requisitar a entrada na rede para o nó principal de um “ramo”:
  - Se a PAN aceita a requisição de entrada na rede de um dispositivo, o coordenador adiciona o dispositivo na sua lista de vizinhos. Em consequência o dispositivo pode se tornar um nó coordenador para outros dispositivos que queiram se filiar a rede, transmitindo *beacons* periodicamente.
  - Se por alguma razão o dispositivo candidato não poder entrar na rede por meio daquele nó principal em um dado “ramo”, o dispositivo irá procurar um coordenador de “ramo” que o aceite.

Para uma rede de larga escala é possível construir uma malha de múltiplas vizinhanças pertencentes ao mesmo coordenador (Figura 5).

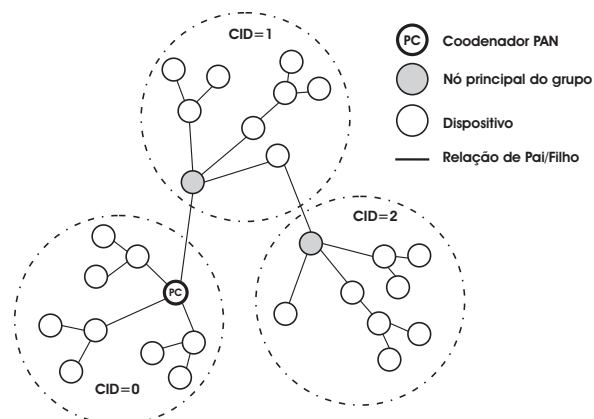


Figura 5: Representação do modelo de uma topologia em árvore.

### 2.1.3 IEEE 802.15.4 - Camada Física (PHY)

A camada física é responsável pela transmissão e recepção de dados usando um certo canal de rádio e de acordo com uma modulação específica e com uma técnica de espalhamento.

O IEEE 802.15.4 oferece três bandas de frequência operacionais: 2,4 GHz, 915 MHz e 868 MHz. Há um único canal entre 868 e 868,6 MHz, 10 canais entre 902 e 928 MHz, e 16 canais entre 2,4 e 2,4835 GHz (Figura 6). O protocolo também permite seleção dinâmica de canal, detecção de energia recebida, lista de canais suportados na procura de um flag (beacon), indicação de qualidade do link e comutação de canais.

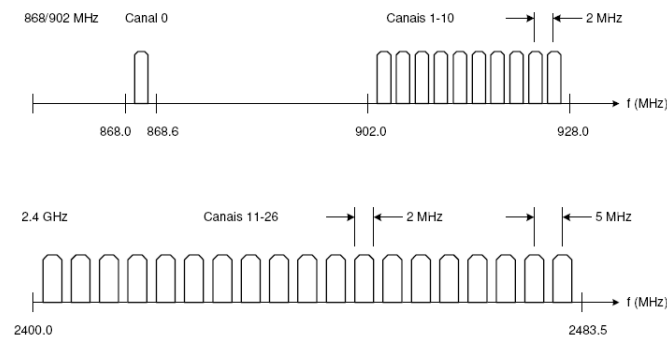


Figura 6: Representação do modelo de banda para os canais no padrão 802.15.4.

A taxa de transferência de dados é de 250 kbps para 2,4 GHz, 40 Kbps para 915 MHz e 20 kbps para 868 MHz. Menores frequências são mais adequadas para transmissões em que se têm intervalos mais longos devido à baixa perda de propagação. Baixas taxas de transmissão proporcionam uma melhor sensibilidade e maior área de cobertura. Taxas mais elevadas significam maior potência, menor latência ou menores ciclos de trabalho. Todas estas bandas de frequência são baseadas na técnica de espalhamento *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS). As características de cada banda de frequência (modulação, taxa de bits, ...) são postas na Tabela 2.

Tabela 2: Bandas de frequências e taxas de dados.

Banda de Frequência (MHz)	Parâmetros de Espalhamento		Parâmetros dos Dados		
	Chip rate (kchip/s)	Modulação	Taxa de bits (kbps)	Taxa de símbolos (ksímbolos/s)	símbolos
868	300	BPSK	20	20	binário
915	600	BPSK	40	40	binário
2400	2000	O-QPSK	250	250	16-ary

A camada física do IEEE 802.15.4 está a cargo das seguintes tarefas:

- Ativação/Desativação do transmissor de rádio:  
O transmissor de rádio pode operar em um dos seguintes estados: transmitindo, recebendo ou dormindo. Sob o comando da sub-camada MAC, o rádio é posto em ON ou OFF. O tempo de transição entre os estados transmitindo↔recebendo não pode ser superior que o período correspondente à 12 símbolos de acordo com o padrão (cada símbolo equivale à um nibble).
- Detecção de energia (ED ) dentro do canal atual:  
Trata-se de uma estimativa da força do sinal recebido dentro da largura de banda de um canal do protocolo IEEE 802.15.4. Esta tarefa não realiza nenhuma identificação ou decodificação no canal. O tempo para detecção de energia deve ser igual ao período para 8 símbolos. Esta medição é normalmente utilizada pela camada de rede como uma parte do algoritmo de seleção de canal ou para efeitos de avaliação do modo de canal (Clear Channel Assessment - CCA ), para determinar se o canal está ocupado ou ocioso.
- Indicativo de qualidade do link (LQI ):  
A medida LQI caracteriza a força/qualidade de um pacote recebido. Ela estima a qualidade de um sinal recebido em um link. Esta medição pode ser implementada utilizando-se um receptor ED, um sinal para estimar o ruído ou uma combinação de ambas as técnicas. O resultado LQI pode ser usado pelas camadas superiores (Camadas de Rede e de Aplicação), mas este procedimento não é especificado no padrão.
- Avaliação do modo do canal (CCA):  
Esta operação é responsável por relatar o estado médio de atividade: ocupado ou ocioso. O CCA é realizado em três modos operacionais:
  - Modo de detecção de energia: O CCA relata ocupado se a energia detectada está acima do limiar ED.
  - Portadora: O CCA relata estado médio ocupado somente se o sinal detectado satisfaz as características de modulação e espalhamento do IEEE 802.15.4 e que pode ser maior ou menor que o limiar ED.
  - Portadora com Modo de detecção de energia: Esta é uma combinação das técnicas mencionadas anteriormente. O CCA relata que o estado médio é ocupado somente se detectar um sinal com as características de modulação e espalhamento

do IEEE 802.15.4 e com energia acima do limiar ED.

- Seleção de frequência de canal:

O IEEE 802.15.4 define 27 diferentes canais sem fio. Uma rede pode suportar somente parte deste conjunto de canais. Por isso, a camada física deverá ser capaz de sintonizar seu transmissor dentro de um canal específico requerido por uma camada superior.

Já existem sensores comercialmente disponíveis que sejam compatíveis com o IEEE 802.15.4. Por exemplo, o MICAz da Crossbow Tech. fornece uma implementação parcial do IEEE 802.15.4, operando a 2,4 GHz e 250 kbps. Ele utiliza 5 MHz para o espaçamento do canal conforme o padrão.

#### 2.1.4 IEEE 802.15.4 - Camada de Controle de Acesso ao Meio (MAC)

A sub-camada MAC do protocolo IEEE 802.15.4 fornece uma interface entre a camada física e camadas superiores dos protocolos das LR-WPAN's.

A sub-camada MAC do protocolo IEEE 802.15.4 tem algumas características em comum com a sub-camada do protocolo IEEE 802.11, tal como o uso de CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Contention Avoidance) como um protocolo de acesso ao canal. Entretanto, a especificação da sub-camada MAC IEEE 802.15.4 está adaptada às exigências das LR-WPAN's, como por exemplo, eliminação do mecanismo RTS/CTS (usado no IEEE 802.11) para reduzir a probabilidade de colisões, uma vez que colisões são mais prováveis de ocorrer em redes de baixas taxas.

O protocolo MAC oferece dois modos operacionais, os quais podem ser selecionados pelo coordenador:

- Modo Flag-habilitado: *Flags* (beacons) são periodicamente gerados pelo coordenador para sincronizar os dispositivos conectados e para identificar a PAN. Um *Flag frame* é (o primeiro) parte de um superframe, que também incorpora todos os dados trocados entre os nós e o coordenador da rede. Transmissões de dados entre os nós também são permitidos durante a duração do superframe.
- Modo Flag-não habilitado: neste modo, os dispositivos podem enviar seus dados simplesmente utilizando CSMA/CA não-encaixados. Não há qualquer uso de estruturas

tipo superframes neste modo operacional.

Na Figura 7 podemos observar uma estrutura dos modos operacionais do IEEE 802.15.4.

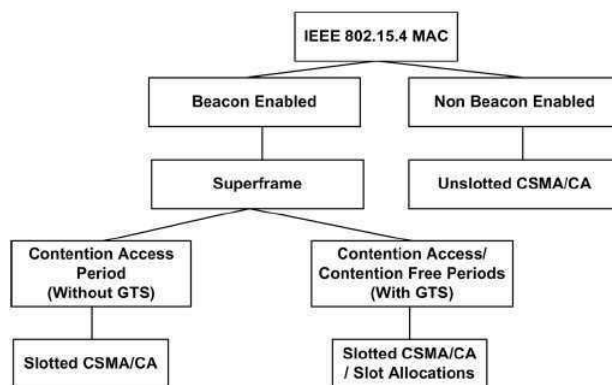


Figura 7: Diagrama descritivo dos modos de operação.

## 2.2 A Tecnologia ZigBee

Uma das tecnologias mais recentes dentro do grupo de redes para aplicações pessoais e que permite o gerenciamento e controle desses dispositivos é a tecnologia ZigBee, que foi desenvolvida para se tornar uma alternativa de comunicação em redes que não necessitem de soluções mais complexas para seu controle, barateando assim os custos com a aquisição, instalação de equipamentos, manutenção e mão de obra. Trata-se de uma tecnologia relativamente simples, que utiliza um protocolo de pacotes de dados com características específicas, sendo projetado para oferecer flexibilidade quanto aos tipos de dispositivos que pode controlar [15]. Tendo como uma de suas principais características o baixo consumo de energia em seu modo *sleep* e sua baixa taxa de transmissão (o limite superior da taxa de transmissão dele é de 250 Kbps). Os dispositivos baseados na tecnologia ZigBee operam na faixa ISM (Industrial, Scientific and Medical) que não requer licença para funcionamento, incluindo as faixas de 2,4 GHz (Global), 915 MHz (América do norte) e 868 MHz (Europa) e com taxas de transferência de dados de 250 kbps em 2,4 GHz, 40 kbps em 915 MHz e 20 kbps em 868 MHz. O padrão oferece atualmente *interfaces* com velocidades de conexão compreendidas entre 10 Kbps e 115 Kbps e com um alcance de transmissão entre 10 m e 100 m, dependendo diretamente da potência dos equipamentos e de características ambientais (obstáculos físicos, interferência eletromagnética, etc).

O nome ZigBee foi criado a partir da analogia entre o funcionamento de uma rede em malha, e o modo como as abelhas trabalham e se locomovem. As abelhas que vivem

em colméia voam em Zig Zag, e dessa forma, durante um vôo a trabalho em busca de néctar, trocam informações com outros membros da colméia sobre, distância, direção e localização de onde encontrar alimentos. Uma Malha ZigBee dispõe de vários caminhos possíveis entre cada nó da rede para a passagem da informação, assim, é possível eliminar falhas se um nó estiver inoperante, simplesmente mudando o percurso da informação [13].

## 2.3 O Transceptor ZigBee/IEEE 802.15.4

O *kit* utilizado possui módulos transceptores, os quais operam na banda de 2,4 GHz, para integração em sistemas que pretendam transmitir informação por RF. Suportando o protocolo ZigBee, ou apenas o padrão 802.15.4, e diferentes topologias, os módulos caracterizam-se por ausência de configuração externa (“programação” por *software* próprio) quando utilizados com suas configurações de fábrica, sendo possível realizar as operações pretendidas através de comandos AT e de operações específicas de controle, ou realizando as modificações necessárias diretamente sobre o padrão IEEE 802.15.4, o que nos permite uma maior interação com o *hardware* do dispositivo, minimizando os custos com outros componentes envolvidos no processo de aquisição de dados e processamento da informação. Em contrapartida, existe a necessidade de um conhecimento mais aprimorado do padrão visto que as modificações necessárias a implementação de uma aplicação customizada são realizadas através de primitivas, diretamente na pilha do padrão. Assim, destinam-se a interagir com dispositivos por meio de uma *interface* RS-232, encarregando-se da transmissão e recepção dos dados pretendidos.

Apresentam dimensões reduzidas (inferiores a 3 cm por 3 cm) existentes em duas versões distintas: XBee (Figura 8) e XBee Pro. Esses modelos por sua vez, diferem no alcance da transmissão, e por consequência, na potência exigida para a mesma. Ao XBee estão associados uma potência de 1 mW e um alcance de 100 m, em campo aberto, ou 30 m para locais fechados. Enquanto que o XBee Pro opera com uma potência de 60 mW, permitindo-lhe alcançar um raio de transmissão até 1,6 km, campos abertos, ou 100 m em locais fechados.

Em termos de consumo, são dispositivos que apresentam um consumo muito reduzido (inferior a  $10 \mu A$ ) quando em estado *sleep*, o qual pode aumentar dependendo da necessidade de alimentação quando estiver em estado de operação (recepção ou transmissão). Uma vez em modo de operação, o XBee apresenta menor consumo energético quando



Figura 8: Módulo transceptor usado no sistema.

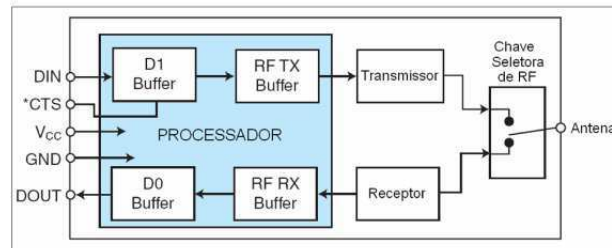


Figura 9: Diagrama da estrutura interna do módulo XBee/XBee-PRO.

comparado ao XBee PRO - corrente de aproximadamente 50 mA para uma tensão de alimentação de 3,3 V.

Por cumprir os requisitos necessários, o transceptor XBee da *MaxStream/Digi/FreeScale* foi a solução inicialmente elegida para o trabalho, uma vez que o mesmo apresenta um consumo reduzido e simples configuração.

Internamente o módulo XBee/XBee-PRO pode ser resumido de acordo com a Figura 9. É basicamente dividido em dois blocos principais: o processador e o transceptor, propriamente dito. O processador usado neste módulo é o M9S08GT60 e o transceptor é o MC13193 ambos da *Freescale*, a fonte geradora de um *clock* de 16 MHz para o módulo pode ser observado no canto inferior direito da foto observada na Figura 10. Uma única antena é usada, necessitando de uma chave comutadora que esta normalmente habilitada para a função de recepção[16].



Figura 10: Circuito elétrico do módulo XBee.



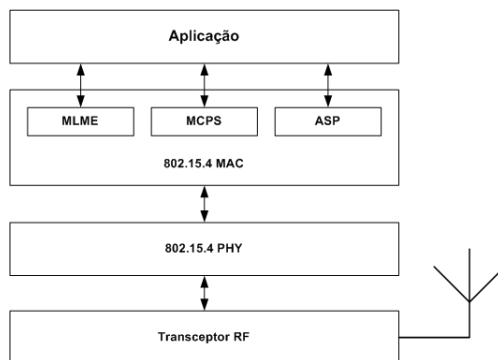


Figura 11: Diagrama de Blocos do sistema.

### 2.3.1 As Primitivas de Comunicação entre as camadas

Na Figura 11 podemos observar um diagrama de blocos do sistema. A aplicação usa as camadas inferiores para implementar uma aplicação sem fio baseado no programa da *Freescale* [17] que implementa a pilha do padrão IEEE 802.15.4.

A aplicação pode ser qualquer coisa e é inteiramente adicionada pelo usuário no módulo. Alguns exemplos são:

- Aplicação MAC dedicada;
- Camada de rede ZigBee;
- Pilha própria.

A camada abaixo da camada de aplicação observada na Figura 11 é a camada MAC da pilha 802.15.4, esta camada utiliza três *interfaces* para interagir com a camada de aplicação.

- A *interface* MLME (MAC Sublayer Management Entity)- Esta *interface* é usada por todos os comandos da camada MAC 802.15.4. Por exemplo, esta camada deve usar esta *interface* para enviar a primitiva MLME-ASSOCIATE.request e receber um MLME-ASSOCIATE.confirm. Esta *interface* é definida no padrão IEEE 802.15.4.
- A *interface* MCPS (MAC Common Part Sublayer - Service Access Point ) - Esta *interface* está relacionada a todas as primitivas de transmissão de dados. A aplicação deve usar esta *interface* para transmitir dados. Esta *interface* é definida no padrão IEEE 802.15.4.

- A *interface* ASP (Application Support Package ) - Esta *interface* é usada por varias características de suporte da camada de aplicação. Por exemplo, esta *interface* pode requerer ao *hardware* para entrar no modo de baixa potência. Esta *interface* é propriedade da Freescale.

## 2.4 Conclusão

## 3 *Propagação do Sinal sem Fio*

Neste capítulo é descrito o modelamento físico das perdas de transmissão entre um par de antenas omnidirecionais de dispositivos que implementam o protocolo de comunicação IEEE 802.15.4 e que formam a rede utilizada para o sistema de estimação de localização do animal. Tal modelamento foi realizado usando como ambiente de medição, as instalações do campo de futebol do complexo poli-esportivo da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, campus I - Campina Grande, devido esta ser uma área aberta e plana, o que configura um cenário quase ideal para aplicações com os objetivos propostos.

### 3.1 Metodologia para caracterização do ambiente

As medições das perdas de transmissão foram realizadas entre um par de antenas omnidirecionais em um terreno plano localizado nas instalações do complexo poli-esportivo da UFCG, área essa referente ao campo de futebol com dimensões de 90x56,2 m. A temperatura média na cidade de Campina Grande durante o mês das medições é de tipicamente 24,2 °C [18], o solo no local das medições é considerado do tipo regossolo distrófico, muito pobre em matéria orgânica, com acidez potencial média e baixa salinidade [19], devido a finalidade do terreno pode-se afirmar que algumas características podem ser influenciadas devido a necessidade de adubação do solo, afirma-se também que este é considerado úmido devido a irrigação realizada diariamente (Figura 12a, 12b).

A área de medição é cercada em parte por uma cerca de metal (de aproximadamente 1,3 m de altura com arame entrelaçado) adjacente a um terreno de solo bastante úmido. Um diagrama esquemático da área pode ser observada na Figura 13.

Dois conjuntos de medições foram realizados com localizações e objetivos diferentes. O conjunto “A” compreende medições do nível de sinal em três pontos no perímetro da área de medição, representados na Figura 13 pelos pontos com forma de triângulo em



(a) Vista aérea do local de medição. (b) Local de medição com terreno marcado em intervalos de 1 m.

Figura 12: Área de medição.

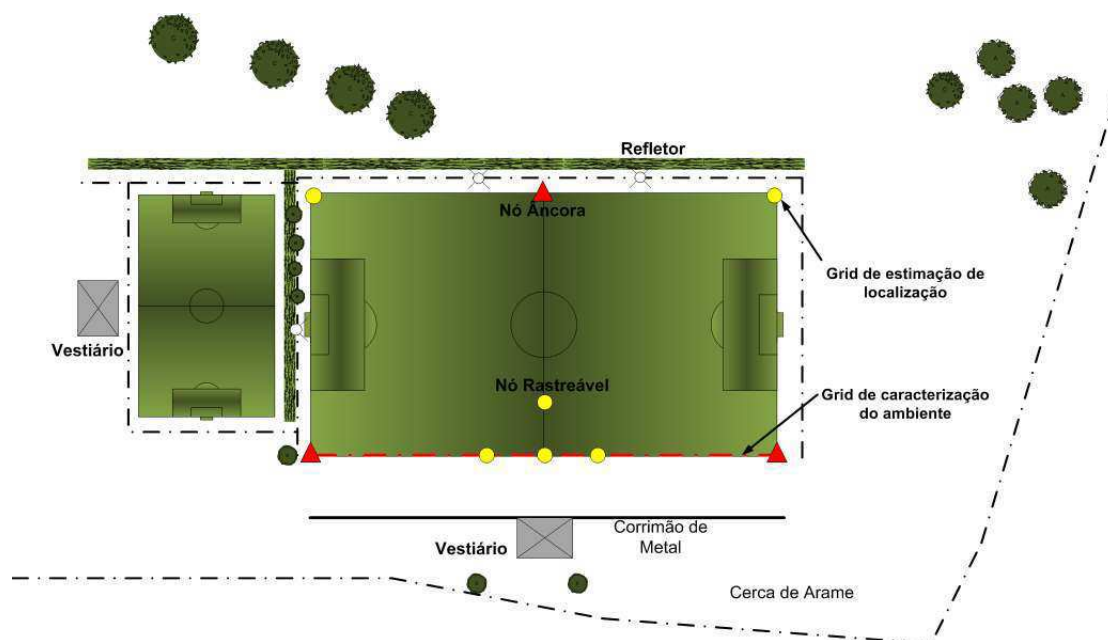


Figura 13: Diagrama esquemático da área de medição.

vermelho, o nó transmissor varia sua posição de acordo com os pontos circulares marcados em amarelo na figura citada, esses pontos são espaçados de 12 m em três direções a partir do ponto que divide a lateral do campo ao meio, além desses, são realizadas medições nos dois “*corners*” opostos aos nós fixos, totalizando um conjunto com 6 pontos de medição, com um conjunto de 500 amostras para cada ponto. Esse conjunto de medição servirá para validar e verificar a precisão do algoritmo de estimação de localização utilizado. O conjunto “B” compreende medições necessárias a caracterização do ambiente no qual o sistema de localização será aplicado, este conjunto de medições é realizado numa linha que acompanha uma das laterais do campo, utilizado como referencial, com espaçamento de medições de 25 cm, o que aumenta a resolução na escala de medições. Nesse conjunto, utiliza-se um par de nós (um transmissor e um receptor), onde obtemos o nível de sinal a cada ponto de medição de modo a se obter a curva característica do sinal propagado no ambiente em relação a distância, o que nos dá um conjunto com 360 pontos de medição. Esse conjunto serve como base de dados para o processo de levantamento de um modelo de propagação do sinal sem fio no ambiente, de acordo com o modelo dos dois raios.

O modelo de propagação pode ser de dois tipos, físico e empírico. O modelo físico foi adotado visto ter a vantagem significativa de portabilidade, i.e. o modelo físico pode ser utilizado em uma variedade de ambientes sem requerer um trabalho extenso de coleta de informações de propagação em cada um dos ambientes. O modelo físico plausível mais simples para o terreno predominantemente plano esperado é um modelo de dois-rios que considera os caminhos direto entre os módulos e o sinal propagado no solo. O comprimento do caminho escolhido engloba o ponto de mais distante interferência construtiva de acordo com a teoria aplicada para este experimento (Figura 14).

O comprimento do caminho correspondente ao ponto de mais distante interferência construtiva é dado por (Equação 3.1):

$$R = \frac{4h_t h_r}{\lambda} \quad (3.1)$$

onde  $h_t$  e  $h_r$  são as alturas do transmissor e do receptor respectivamente e  $\lambda$  é o comprimento de onda [20]. O padrão IEEE 802.15.4, como já mencionado, opera na faixa ISM, com uma banda de 16 canais entre 2,4 e 2,4835 GHz correspondendo a um comprimento de onda entre 12,07 e 12,49 cm. O protocolo permite seleção dinâmica de canal (uma função que salta através de uma lista de canais suportados a procura de um beacon) e, usando detecção do nível de energia no canal, permite uma indicação da qualidade do

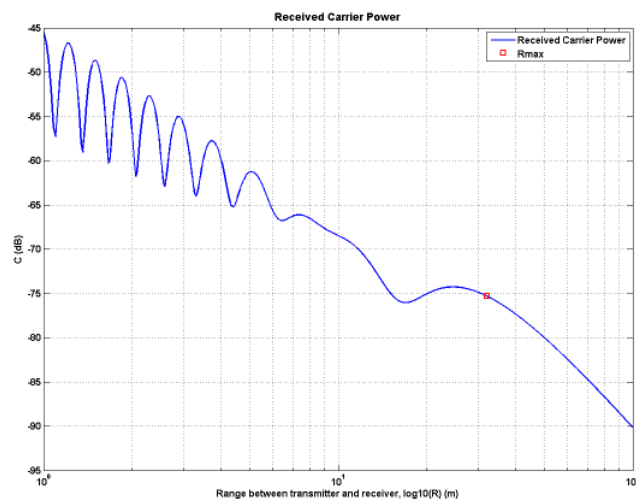


Figura 14: Nível teórico de sinal recebido para para o cenário experimentalado.



Figura 15: Barra de medição com múltiplos nós, para caracterização do ambiente.

*link.*

Os módulos transmissor e receptor foram posicionados a uma altura de 1 m. Essas medições foram usadas para conseguir/testar modelos candidatos da perda de transmissão que pode ser usado no algoritmo de estimação de localização que é o objetivo deste trabalho. Com o objetivo de acelerar o processo de medição, 4 módulos espaçados de 25 cm foram montados numa barra horizontal, Figura 15, permitindo múltiplas medições simultaneamente, que originaram o conjunto “B” de medições.

Isto é possível desde que o pacote enviado pelos nós tenha um identificador do nó de origem. A barra espaçada é feita de um cano de PVC para minimizar o efeito do

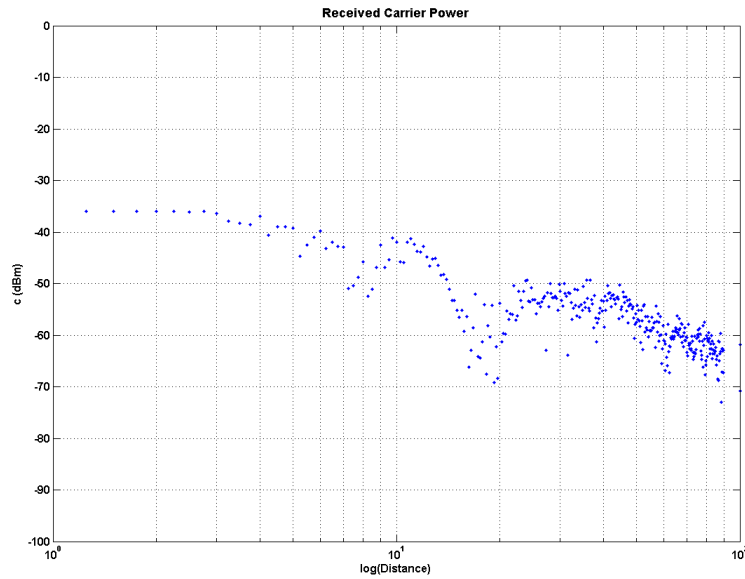


Figure 16: Conjunto de dados obtidos no experimento de campo, sem procesamento.

espalhamento do sinal. Para cada nó transmissor, foi coletado um conjunto com 100 amostras de RSSI em cada ponto de medição. Amostras corrompidas foram descartadas e o valor médio do conjunto de amostras para cada ponto foi obtido.

A potência de saída dos 4 nós transmissores foi configurada para seu valor máximo de 18 dB. O efeito de pequenas diferenças na potência irradiada devido a desvios em relação ao valor nominal previsto pelo fabricante foi minimizado usando a seguinte expressão, de modo a normalizar a potência de saída de cada módulo com um mesmo valor médio de acordo com a Equação 3.2:

$$\hat{y}_i = y_i - \bar{y}_i + \frac{1}{4} \sum_{j=0}^3 \bar{y}_{i+j} \quad (3.2)$$

onde  $y_i$  denota a potência recebida do transmissor  $i$  e  $\bar{y}$  representa o valor médio do conjunto de medidas de cada módulo.

O conjunto dos dados sem o tratamento aplicado com uso da Equação 3.2 pode ser visualizado na Figura 16 e o resultado de tal tratamento na Figura 17.

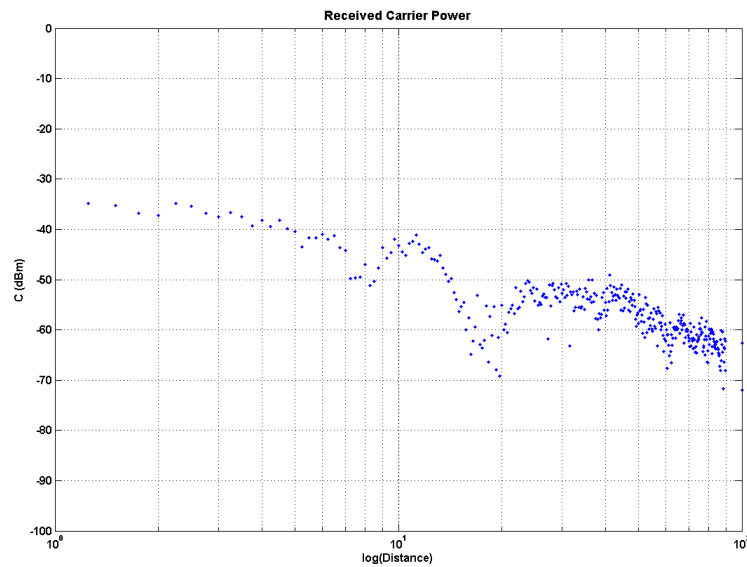


Figure 17: Conjunto de dados obtidos no experimento de campo, após rotina de processamento inicial.

### 3.2 O modelo físico de propagação

O modelo mais simples de propagação no ambiente é aproximado pelo modelo de propagação dos dois caminhos ou dois raios como podemos observar na Figura 18.

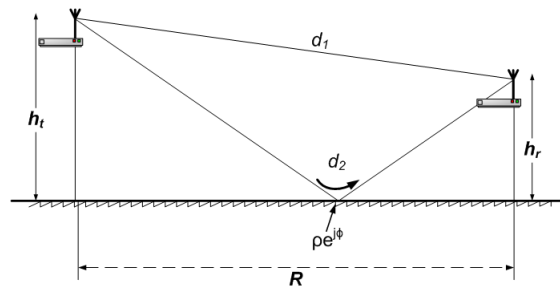


Figura 18: Modelo de propagação dos dois raios.

A potência do sinal refletido no solo depende de características como comprimento da antena, geometria do link de comunicação, características elétricas do solo no ponto de reflexão e rugosidade do solo neste mesmo ponto. Um coeficiente de reflexão complexo,  $\rho e^{j\phi}$ , pode ser definido tal que  $\rho$  é a razão da magnitude da potência do campo da onda refletida em relação a onda incidente e  $\phi$  é o avanço de fase que ocorre nessa reflexão. O coeficiente de reflexão para um campo incidente polarizado paralelamente a superfície de incidência é dado pela equação de Fresnel (Equação 3.3)[21],[22]:



$$\rho_{\parallel} = \frac{(k_2/k_1)^2 \cos\theta_i - \sqrt{(k_2/k_1)^2 - \sin^2\theta_i}}{(k_2/k_1)^2 \cos\theta_i + \sqrt{(k_2/k_1)^2 - \sin^2\theta_i}} \quad (3.3)$$

Onde  $k_1$  e  $k_2$  são constantes apropriadas ao meio, para o meio de transmissão e a superfície incidente, respectivamente, e  $\theta_i$  é o ângulo de incidência. Seja o meio de transmissão o ar, o  $k$  utilizado pode ser representado por  $k_1 = 2\pi/\lambda$ . A constante de propagação complexo ao quadrado é dado, por (Equação 3.4):

$$k^2 = w^2 \varepsilon \mu - jw\sigma\mu \quad (3.4)$$

Onde  $w = 2\pi f$  é a frequência angular,  $\varepsilon$  é a permissividade elétrica do meio,  $\mu$  é a permeabilidade magnética e  $\sigma$  é a condutividade elétrica.

A magnitude do coeficiente de reflexão de Fresnel é reduzida pelo fator de rugosidade de Rayleigh utilizado para adicionar as perdas devido a difusão da onda refletida no solo. Este fator é dado por (Equação 3.5):

$$R = e^{-8\{\pi s(\sin\gamma)/\lambda\}^2} \quad (3.5)$$

A rugosidade da superfície no contexto da reflexão depende não somente da escala das alturas aleatórias que o solo pode assumir, mas também do complemento do ângulo de incidência ( $\gamma$ ). Assumindo que os ângulos de partida e de chegada do raio refletido no chão, para transmissores e receptores, é pequeno comparada ao comprimento das antenas (quer dizer, não há uma redução significativa no ganho da antena devido ao caminho do raio refletido estar fora do eixo de propagação) então a potência do sinal recebido na antena receptora será modificado pelo seguinte fator de ganho (Equação 3.6):

$$F = 1 + \rho_{ef} e^{-j2\pi(d_2-d_1)/\lambda} \quad (3.6)$$

A potência total recebida é então dada pela Equação 3.7:

$$P_r = P_t G_t \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_r \times |F|^2 \quad (3.7)$$

onde  $G_t$  é o ganho na antena do módulo transmissor (=1.5 dBm),  $G_r$  é ganho na antena do módulo receptor (=1.5 dBm),  $P_t$  é a potência do sinal transmitido configurado no módulo

de comunicação ( $=18$  dBm) e  $R$  é a distância entre os módulos transceptores (m).

### 3.3 Estudo de Caso - Caracterização de um ambiente de vegetação rasteira em Patos

O processo de medição das perdas de transmissão foi realizado num campo aberto com uma configuração de acordo com o observado na Figura 19, essa area está localizada nas proximidades do campus da Universidade Federal de Campina Grande em Patos no sertão da Paraíba no nordeste brasileiro, que se caracteriza por ser uma região de clima quente e solo seco. Parte da área de medição é delimitada por uma cerca de arame e outra parte por uma cerca de madeira. Os pontos de medição foram distribuídos de acordo com um grid com espaçamento de 10 m entre pontos, e que são utilizados para gerar uma base de dados para implementação dos algoritmos de estimação de localização.

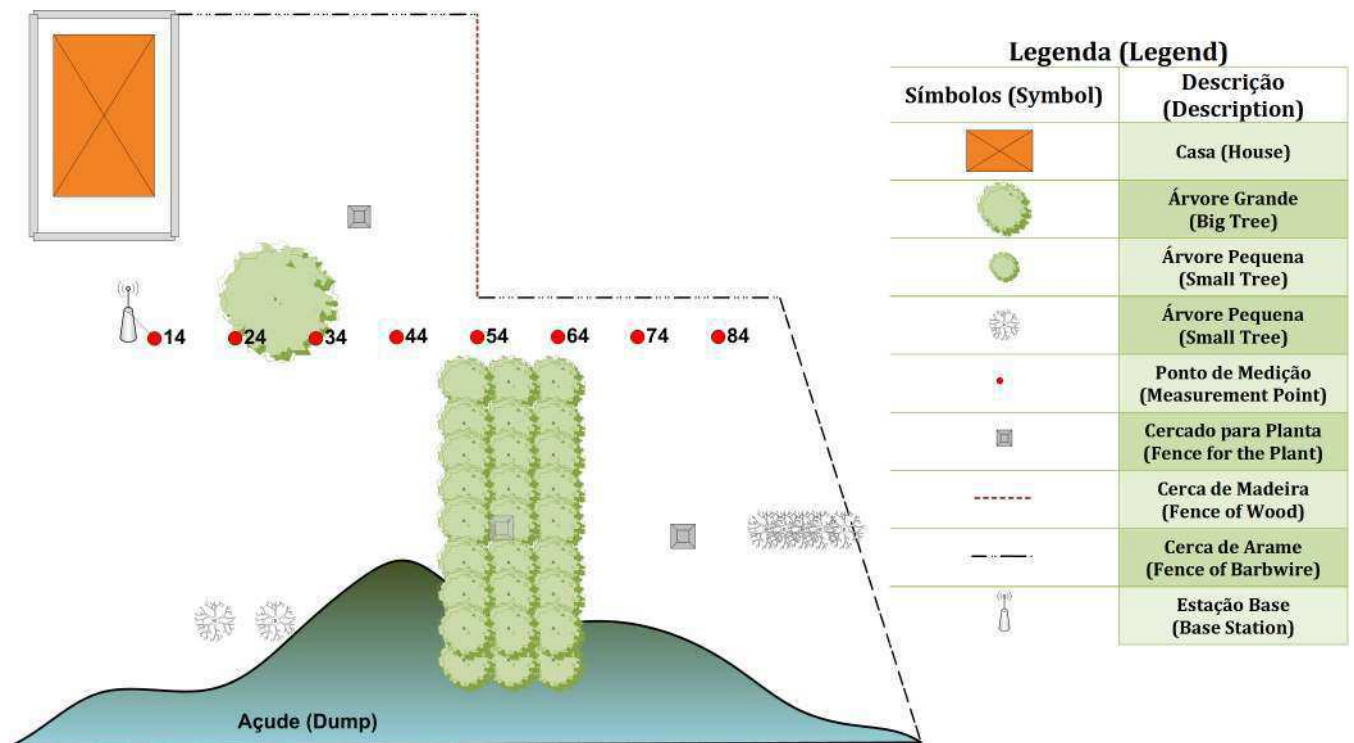


Figure 19: Diagrama esquemático do local das medições.

O conjunto de medições para o levantamento da curva característica das perdas de transmissão foi realizado usando-se um módulo receptor e cinco módulos transmissores, posicionados sobre uma estrutura de PVC, formando uma barra de 1 m com nós espaçados de 20 cm (Figura 15) com antenas polarizadas verticalmente.



Figure 20: Estrutura montada para o conjunto de nós transmissores.

A cada ponto de medição foi obtido um conjunto de 150 amostras para cada nó, após essa medição, a barra era deslocada de um metro, de modo que houve uma varredura em uma linha reta entre os pontos 24 e 84 cobrindo uma distancia de 62 metros, que através de calculos preliminares de acordo com a Equação 3.1, engloba o ponto de mais distante interferência construtiva (*Point of farthest constructive interference*).

Os nós transmitiam por *broadcast* um pacote de dados, de modo que a informação do *received signal strength* (RSS) associada a cada pacote fosse armazenada para cada nó em um banco de dados e posteriormente tratados. O processo de aquisição nos forneceu um conjunto com 310 arquivos, referentes a cada posição de medição, cada arquivo foi processado de forma a eliminar-se qualquer dado corrompido presente no conjunto de 150 amostras, não diminuindo estas a um numero minimo de 100 amostras, caso contrário o conjunto de dados eram substituidos pela media dos valores dos arquivos referentes as posições anterior e posterior ao ponto de medição. Processo esse, que foi aplicado a 9,67% dos dados.

Objetiva-se com o conjunto de dados, obter uma curva de potência recebida com as mesmas características da curva observada na Figura 3.7, e dessa forma, sabendo o nível de potencia transmitido, obter a curva de perdas de transmissão no intervalo de medição realizado.

A curva de perdas pode ser obtida por meio dos dados de forma simples, aplicando a relação direta de potência e perdas (Equação 3.8):

$$L_t = P_t - P_r \quad (3.8)$$

### 3.3.1 Resultados

O primeiro teste realizado foi para comparação do modelo físico com os dados obtidos por meio do experimento, os parâmetros do modelo usados nessa comparação, seguem as recomendações do ITU-R, ou seja, para uma frequência de comunicação de 2,4 GHz e um solo mediantemente seco, temos,  $\epsilon_R = 15$  e  $\sigma = 0,2$ , foi usado também, um desvio padrão do solo de  $s = 3$  cm. Tal comparação, observada na Figura 21, possui um erro rms de  $e = 6,27$  e claramente não representa a melhor modelagem para o conjunto de dados.

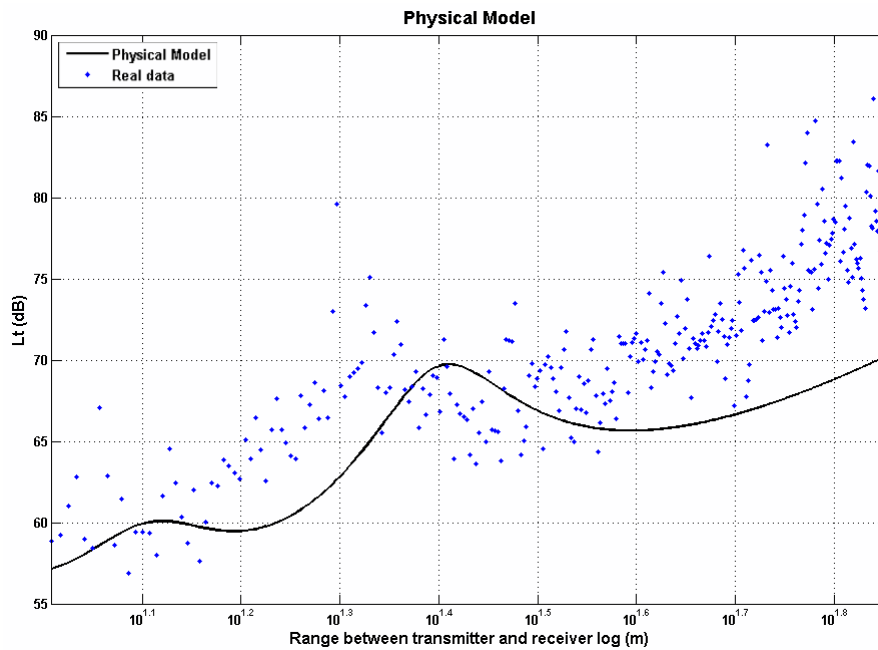


Figure 21: Comparação para o modelo Físico com  $\epsilon_R = 15$  e  $\sigma = 0,2$ ,  $s = 3$  cm

Devido a essa discrepância entre o modelo e os valores reais, foram aplicados outros dois parâmetros no modelo físico, um *off-set* ( $C$  (dBm)) de potência e um *off-set* de distancia  $v$ . Os *off-sets* visam minimizar erros devidos principalmente ao VSWR (*voltage standing wave ratio*) de ambas as antenas (receptor e transmissor) e possíveis diferenças de hardware relevantes ao ganho de saída do dispositivo, além de erros de medição em relação a marcação do terreno. Desse modo o tem-se um modelo físico estendido representado por uma função com as seguintes variáveis (Equação 3.9), deixando como constantes, os parametros de especificação dos módulos ( $P_t, P_r, G_t, G_r$ ) e o desvio padrão do solo (3 cm) e os parâmetros recomendados pelo ITU-R  $\epsilon_R = 15$  e  $\sigma = 0,2$ :

$$L_t = \hat{L}_t(\epsilon_R, \sigma, v) + C \quad (3.9)$$

A partir dessa função foi criada uma rotina de minimização de erro, baseada numa função da otimização *fminimax* presente no MATLAB, onde as variáveis para minimização são os *off-sets* de potência e distância. Esse processo, nos forneceu como resultado a curva da Figura 22 e os seguintes valores de *off-set*:  $C = 4,7$  dB  $v = 0,96$  m.

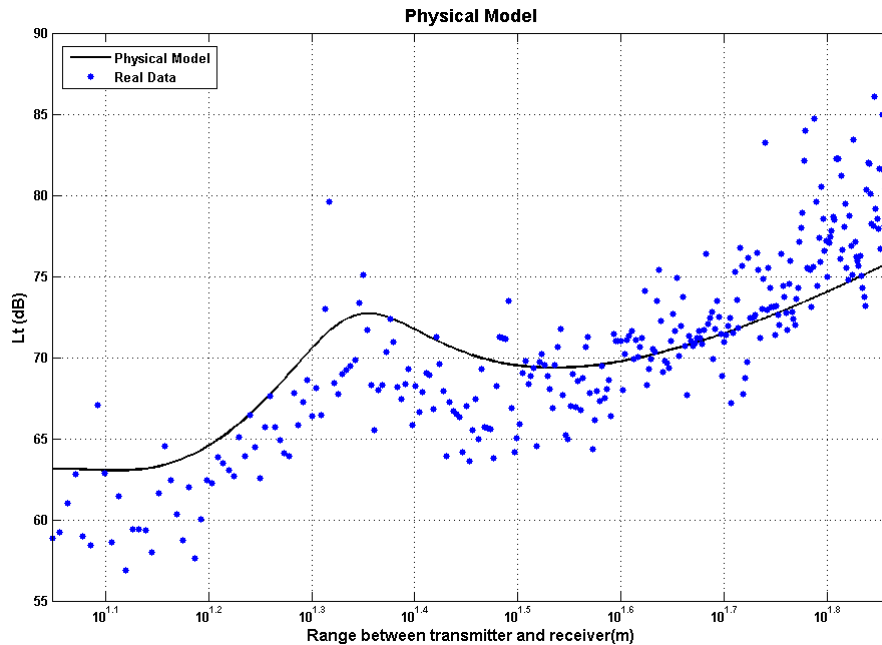


Figure 22: Comparação para o modelo Físico utilizando otimização de *off-set*.

Tais valores minimizaram o erro rms para  $e = 4$ .

Porém, o erro entre o modelo e conjunto de dados pode ser reduzido ainda mais, por meio de uma otimização dos parâmetros elétricos inerentes ao meio. Este procedimento muda a forma da curva permitindo que as características devido a reflexão do sinal do solo sejam alteradas de modo que o modelo melhor se adeque ao conjunto de dados. A Figura 23 ilustra um modelo com os parâmetros elétricos otimizados em  $\epsilon_R = 18,33$  e  $\sigma = 7,25$  S/m. O erro rms após tal otimização de parâmetros foi reduzido para  $e = 3,2$  dB.

Tal otimização implica num modelo com parâmetros diferentes dos recomendados pelo ITU-R, porém, a proximidade entre os dados e o modelo são suficientemente bons para encorajar uma investigação adicional de um algoritmo de localização fundado na implementação do modelo de dois-raios [23].

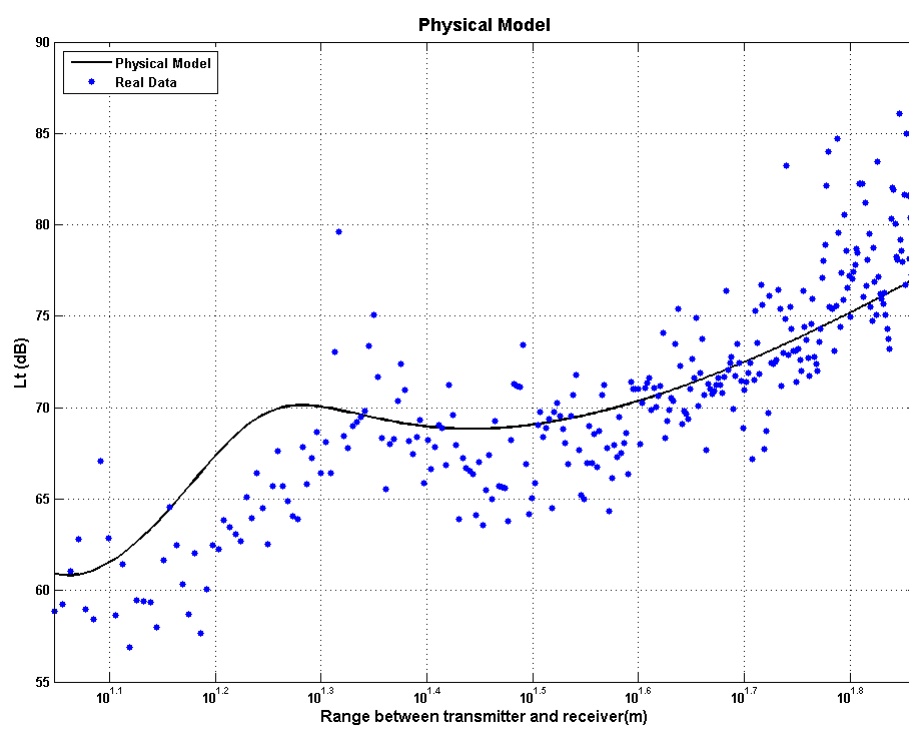


Figure 23: Comparação para o modelo Físico extendido com  $\varepsilon_R = 18,33$  e  $\sigma = 7,25$ ,  $s = 3$  cm

## 4 *Sistemas de Localização*

Neste capítulo é descrito o método utilizado em uma rede IEEE 802.15.4 que usa a potência do sinal recebido para determinar a localização de um objeto, além de outros métodos de estimação de localização em RSSF. Limitações praticas desses métodos serão brevemente revisadas. Dentre eles, ao método baseado em potência do sinal recebido é reservado uma maior atenção devido aos seus requerimentos mínimos de *hardware* e sua simplicidade de implementação.

### 4.1 Introdução

Uma das aplicações de rede sem fio para curtas distancias é a determinação aproximada da localização física de um objeto em um dado instante de tempo. O conhecimento em tempo real de pessoas, propriedades, e instrumentos portáteis podem tornar o gerenciamento mais eficiente. A estimação de localização, é o processo de obtenção da informação de localização de um nó em relação à um conjunto de posições de referência conhecidos.

Os sistemas de localização desenvolvidos que usam redes sem fio de curta distância também são chamados de sistemas de posicionamento local (LPSs - *Local Positioning Systems*) para diferenciar do chamado sistema de posicionamento global (GPS - *Global Positioning System*). O sistema LPS ao contrario de um sistema GPS não usa informação proveniente de um satellite ou transmissor de longa distância.

A escolha do algoritmo de estimação de localização depende do cenário no qual o sistema é implementado. Os métodos de estimação de localização são comparados baseados na sua complexidade e desempenho. A precisão na localização, que relaciona a posição atual com a posição estimada, é talvez o mais intuitivo parâmetro de desempenho. Se o objetivo da estimação da localização é para o rastreamento de pessoas, uma precisão grosseira de alguns metros pode ser suficiente. Um sistema de localização simples e de baixo

custo, baseados em redes sem fio de curtas distâncias pode ser implementado utilizando o protocolo ZigBee, porém que não é tão bom para aplicações com escalas de precisão em centímetros. Sinais em UWB (*Ultra-Wideband*) são mais apropriados para este tipo de sistemas de localização [24].

O tempo para determinação do posicionamento de um nó também é um critério de desempenho. Durante a disputa no período de acesso a canal, por exemplo, um nó zigbee pode realizar muitas tentativas antes de ganhar acesso ao canal. O desempenho de cobertura especifica o máximo espaço físico que uma LPS pode cobrir e o sucesso no rastreamento do posicionamento de um nó. Escalabilidade é outro parâmetro que determina quão bem o algoritmo de localização se adapta quando o número de nós e a área de cobertura aumenta. Em aplicações de baixo custo, com nós associados a baterias, a capacidade computacional e o espaço na memória são limitados. Deste modo, estes nós não são aptos a implementação de algoritmos de maior complexidade computacional.

A estimação da localização usualmente envolve dois grupos de nós. O primeiro grupo consiste de nós fixos com localização conhecida. Estes nós fixos são referenciados como nós âncora (*Anchor Node*), são usados como referência para estimação de localização. A localização do nó âncora pode ser determinada pelo instalador, ou, esse pode ser equipado com um GPS para determinar sua própria localização.

O segundo grupo são os nós com posições desconhecidas, chamados de nós rastreáveis (*Tracked Nodes*). O objetivo principal do sistema de localização é determinar a posição dos nós rastreáveis com a ajuda dos nós âncoras.

A ideia básica de um sistema LPS pode ser resumida da seguinte forma. Um nó rastreável com posição desconhecida emite um sinal que é recebido por seus vizinhos nós âncoras. O nó âncora mede o RSS, o tempo de viagem (TOA - *Time of Arrival*), ou o ângulo de chegada (AOA - *Angle of Arrival*) do sinal recebido. Estes valores medidos são usados como entradas para o algoritmo de localização utilizado que determina aproximadamente a localização do nó rastreável. O algoritmo usa apenas uma dessas três entradas. A medição de RSS é bastante simples e os nós ZigBee são capazes de medir RSS para cada pacote recebido. A determinação do tempo de viagem, requer um *clock* de alta precisão. Encontrar o ângulo de chegada requer modificações de *hardware* o que pode aumentar os custos. A maioria dos algoritmos de localização baseados em *links* RF usam apenas o RSS para estimar a localização devido a sua simplicidade e pouca ou nenhuma mudança de *hardware* [25].



## 4.2 Algoritmos de Localização Baseados em RSS

O RSS pode ser medido para cada pacote recebido. A energia do sinal medido é quantizada para formar o indicador de potência do sinal recebido (RSSI - *Received Signal Strength Indicator*). O RSSI e o tempo no qual o pacote foi recebido, pode ser disponibilizado pelas camadas MAC, NWK (*Network*) e APL (*Application*) para qualquer tipo de análise.

Existem quatro parâmetros associados ao RSSI: Escala dinâmica, precisão, linearidade e o tempo médio. A escala dinâmica do RSSI é medida em dB os valores mínimo e máximo de RSSI que o dispositivo é capaz de medir. A precisão do RSSI indica o erro medio que associado a cada RSS medido. Um valor comercial típico para um transceptor é de  $\pm 4$  dB. A linearidade no RSSI indica o desvio máximo que a curva pode ter para uma reta em relação a atual potência do sinal recebido em escala logarítmica. O RSS é medido sobre um periodo de tempo e então é realizada uma média para gerar o RSSI. O tempo da média é de oito ciclos de máquina, o qual é requerido pelo IEEE 802.15.4 se o RSSI for usado para gerar o indicador de qualidade de *link* (LQI - *Link Quality Indicator*). O método mais simples de determinar a posição de um nó é requisitar ao nó rastreável o envio de um pacote. A vantagem deste método é que ele pode ser implementado facilmente com baixo custo, nós alimentados com baterias, pequeno tamanho de memória e baixa capacidade de processamento. Entretanto a precisão da estimação de localização pode ser inadequada para muitas aplicações. O melhor caminho de melhorar a precisão deste método é aumentar o número de nós âncoras, o que pode aumentar o custo das implementações.

### 4.2.1 Estimação de Distância Usando RSSI

O processo de estimação de distância usando RSSI normalmente é realizado usando a curva que interpola o padrão de decaimento do sinal sem fio propagado no ambiente (Figura 14), de acordo com a Equação 4.1 [26]:

$$RSSI = -(10 \times n \times \log_{10}d + A) \quad (4.1)$$

onde:

$n$ : é o expoente de perdas do caminho, também conhecido como constante de propa-

gação,  $d$ : é a distância entre os módulos de comunicação.  $A$ : é o RSS a uma distância de 1 m. Como podemos observar nas curvas das Figuras 24 e 25, o processo de estimação de distância utilizando a curva aproximada, insere um erro inerente a região de interferências construtivas e destrutivas presente no padrão de decaimento do sinal no ambiente.

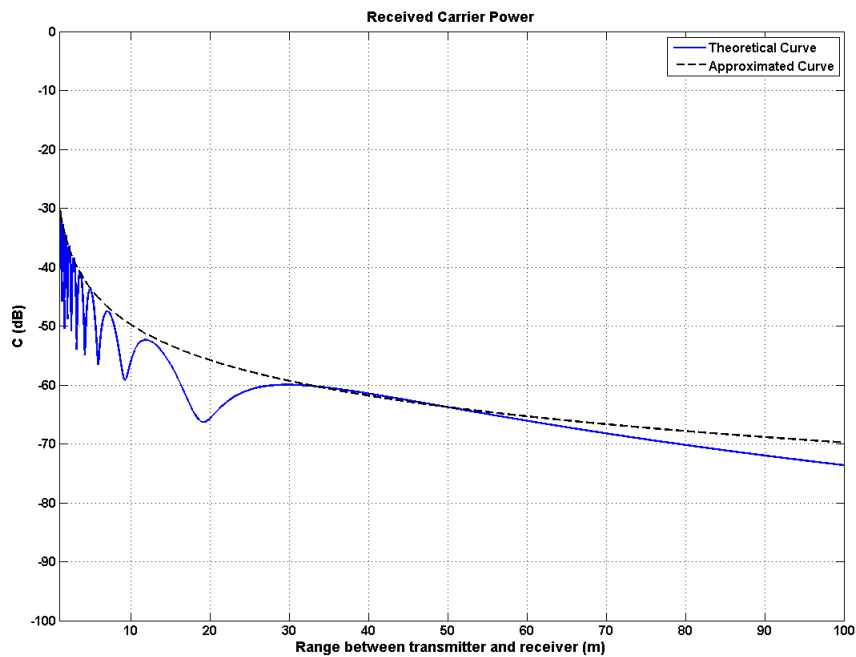


Figure 24: Curva de decaimento do sinal no ambiente com escala normal.

De modo a minimizar tal erro, utiliza-se como forma de estimação de distância o modelo de dois raios para caracterização do ambiente onde o sinal é propagado.

#### 4.2.2 A Estimação de Localização Baseada em RSSI Usando Triangulação

Em um ambiente aberto com alta probabilidade de linha de visão (LOS - *Line-Of-Sight*) sem obstáculos e com baixo efeito de multicaminhos, é possível utilizar um algoritmo simples onde um erro grosseiro é mais aceitável. A propagação do sinal pode ser imaginada como uma esfera expandindo com centro na antena. No espaço livre, a potência do sinal transmitido para uma distância  $d$  a partir da antena é proporcional a  $\frac{P_0}{(4\pi d/\lambda)^2}$ ,

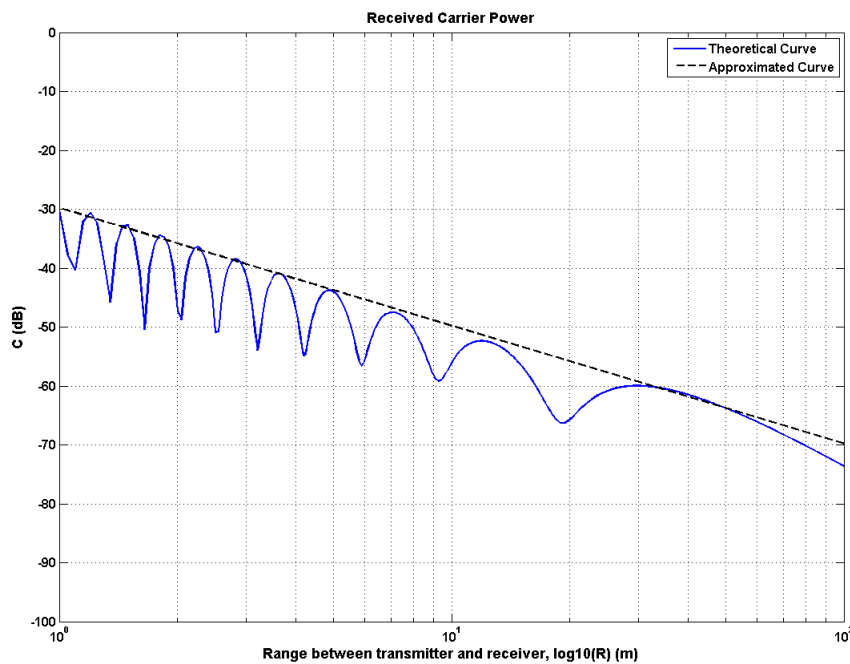


Figure 25: Curva de decaimento do sinal no ambiente com escala logarítmica.

onde  $P_0$  é a potência do sinal na antena [1]. Se a distância de transmissão é duplicada, a potência do sinal no local de chegada é reduzida por um fator de 4. A potência do sinal a uma distância  $d$  é também uma função da frequência. Em um espaço aberto, a potência do sinal a uma distância  $d$  pode ser calculado pela Equação 3.7.

Em cenários mais próximos da realidade, tal como dentro de uma casa, a equação para espaço livre poderá não ter uma precisão suficiente. Isso porque parte do sinal transmitido poderá sofrer absorção de diferentes materiais, o sinal pode ser refletido múltiplas vezes por vários objetos e versões atrasadas do sinal podem ser adicionadas ao sinal original. Todos esse incidentes mudam a potência do sinal. Baseado em varios experimentos [27] a Equação 3.7 também pode ser escrita como 4.2:

$$P_r = P_T - 10 \times n \times \log_{10}(f) - 10 \times n \times \log_{10}(r) + 30 \times n - 32,44(\text{dBm}) \quad (4.2)$$

O valor de  $n$  (expoente de perdas no caminho) pode ser determinado experiencialmente, na Tabela 3 podemos observar alguns valores de  $n$  segundo[28][27][29]. Porém, deve-se observar que o uso de tal equação insere um erro no calculo do RSS inerente a caracterização do ambiente ao qual a aplicação é implementada visto que os valores de  $n$  representam um cenário particular onde o experimento foi realizado.

Aassumindo que todos os nós possuem antenas omnidirecionais, cada um dos nós fixos 1-3 pode estimar a distância ( $r$ ) entre suas localizações e a localização do nó 4. Na Figura 26(a) podemos observar um cenário ideal para estimação de localização onde podemos observar 3 nós com localizações fixas conhecidas. O quarto nó é móvel e o objetivo é determinar a estimativa bidimensional da localização deste nó. Mas o mesmo conceito

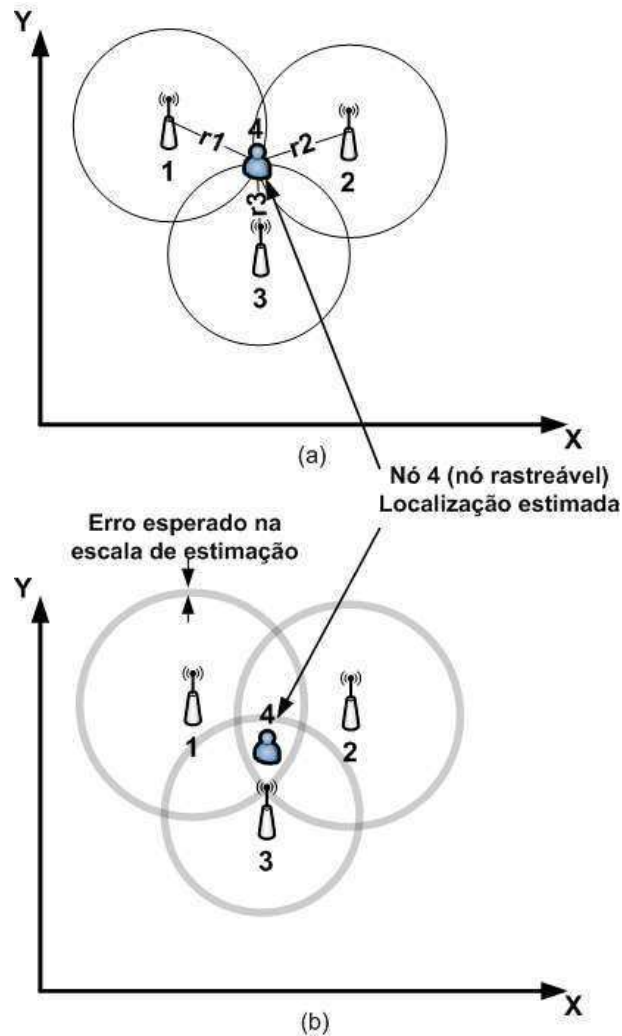


Figure 26: Estimação de localização usando triangulação (a) Caso ideal e (b) Com escala de estimação de erro.

pode ser estendido para o espaço tridimensional.

O nó 1, por exemplo, pode estimar a distância ( $r_1$ ) entre sua localização e a localização do nó 4 usando RSS. A partir de uma única medição feita pelo nó 1, a única conclusão que pode ser feita é que o nó 4 está localizado no perímetro do círculo com raio  $r_1$  centrado no nó 1. Usando a equação da circunferência (Equação 4.6) podemos estimar a distância entre os nós:

$$(x_1 - x_4)^2 + (y_1 - y_4)^2 = r_1^2$$

ou:

$$(x_1 - x_4)^2 + (y_1 - y_4)^2 - r_1^2 = 0 \quad (4.3)$$

Onde  $(x_1, y_1)$  e  $(x_4, y_4)$  são coordenadas para os nós 1 e 4 respectivamente. Equações similares podem ser derivadas para as coordenadas no nó 2 e do nó 3. Desse modo, para encontrar a localização do nó 4, nós precisamos encontrar  $(x_4, y_4)$  que satisfaça o seguinte sistema de equações (Equação 4.5):

$$\begin{bmatrix} (x_1 - x_4)^2 + (y_1 - y_4)^2 \\ (x_2 - x_4)^2 + (y_2 - y_4)^2 \\ (x_3 - x_4)^2 + (y_3 - y_4)^2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_1^2 \\ r_2^2 \\ r_3^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Num cenário ideal como mostrado na Figura 26(a), haverá um par  $(x_4, y_4)$  que satisfará a equação. Este método de determinação da localização relativa entre nós usando geometria de triângulos é referenciado como triangulação. Entretanto, numa implementação prática, devido a erros de medições, talvez não seja possível obter um verdadeiro vetor nulo no lado direito da Equação 4.5 para qualquer valor de  $(x_4, y_4)$ . Os valores de RSSI fornecidos pelos transceptores tem precisão limitada, o que afeta diretamente na estimação de distância entre os nós. O expoente de perdas no caminho é determinado experimentalmente e pode ser a maior fonte de erro. Como podemos observar na Figura 26(b), o círculo associado a cada nó fixo pode não ter apenas um ponto comum de interceptação quando o erro na escala de estimação atual for tão grande quanto o erro de escala de estimação esperado.

Já que não é possível fazer o lado direito da Equação 4.5 um zero real, pode-se definir um vetor erro ( $E$ ) no lugar do zero (Equação 4.5):

$$\left( \begin{bmatrix} (x_1 - x_4)^2 + (y_1 - y_4)^2 \\ (x_2 - x_4)^2 + (y_2 - y_4)^2 \\ (x_3 - x_4)^2 + (y_3 - y_4)^2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_1^2 \\ r_2^2 \\ r_3^2 \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} e_1^2 \\ e_2^2 \\ e_3^2 \end{bmatrix} = E \quad (4.5)$$

onde  $abs(.)$  é o valor absoluto da função.

Se o erro quadrático é definido como (Equação 4.6):

$$SquareError = e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 \quad (4.6)$$

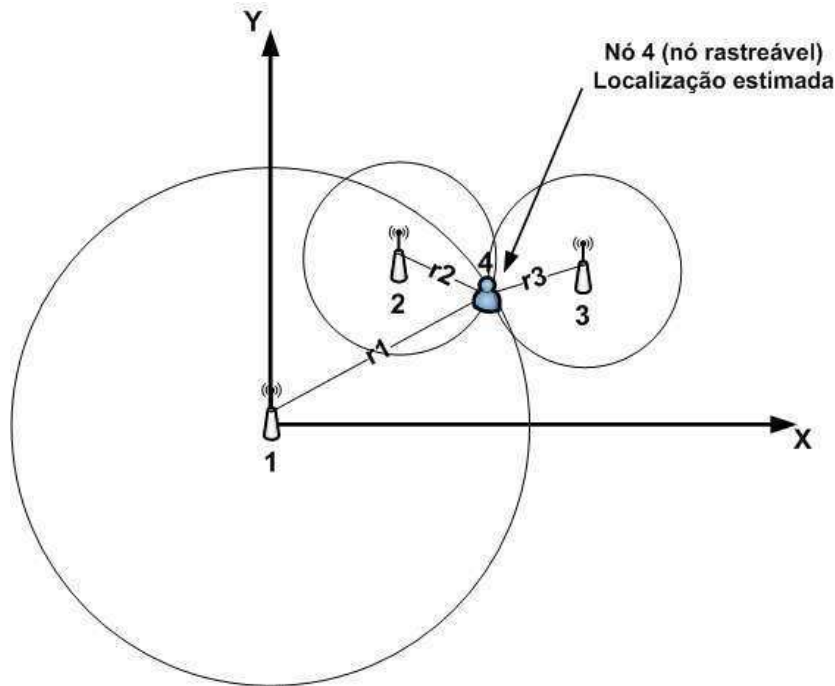


Figure 27: Sistema de estimação de localização simplificado.

Então o objetivo da estimação de localização é encontrar um par  $(x_4, y_4)$  que minimize a Equação 4.5. Este é um simples exemplo do clássico problema de otimização, onde métodos iterativos ou não são utilizados para minimizar o valor do erro da função.

Outro método de solução deste problema pode ser aplicado, simplificando o sistema de equações, apenas deslocando a posição de um dos nós fixos para a origem do eixo coordenado como observado na Figura 27[30].

Nesse modo de solução do problema, temos um sistema simplificado, onde o par  $(x_1, y_1)$  representa a origem do sistema, logo o sistema de Equações 4.4 pode ser reescrito como (Equação 4.8):

$$\begin{bmatrix} x_4^2 + y_4^2 \\ (x_2 - x_4)^2 + (y_2 - y_4)^2 \\ (x_3 - x_4)^2 + (y_3 - y_4)^2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_1^2 \\ r_2^2 \\ r_3^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Subtraindo a linha 1 da linha 2 e a linha 1 da linha 3 e rearranjando as equações, obtemos:

$$\begin{aligned} 2(x_2x + y_2y) &= x_2^2 + y_2^2 - r_2^2 + r_1^2 \\ 2(x_3x + y_3y) &= x_3^2 + y_3^2 - r_3^2 + r_1^2 \end{aligned}$$

Que pode ser simplificado para (Equação 4.8):

$$\begin{bmatrix} x_2 & y_2 \\ x_3 & y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_4 \\ y_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_2^2 + y_2^2 - r_2^2 + r_1^2 \\ x_3^2 + y_3^2 - r_3^2 + r_1^2 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

ou,

$$HX = b$$

Que possui como solução:

$$X = (H^T H)^{-1} H^T b \quad (4.9)$$

Nesse ponto, vale salientar que tal procedimento de redução de equações a partir do deslocamento do referencial do sistema coordenado para a localização de um dos nós âncoras, visa meramente a redução do esforço computacional e uma diminuição do tempo gasto para obtenção da solução, não influenciando no processo de estimação de localização, ou seja, não realiza uma estimação mais ou menos coerente.

Desse modo, o algoritmo de localização implementado segue o fluxograma observado na Figura 28, onde, de posse dos tres valores de potencia recebida em cada nó âncora, é estimado um conjunto de raios para cada nó fixo que por sua vez são combinados de modo a contemplar todas as possibilidades de grupos de tres raios, esse novo conjunto com trincas de raios é aplicado a rotina de estimação de posição que nos retorna um conjunto de soluções com a mesma dimensão do conjunto de raios. Cada solução é examinada de modo que possamos utilizar apenas a solução que proporciona o menor erro quadratico segundo a Equação 4.6.

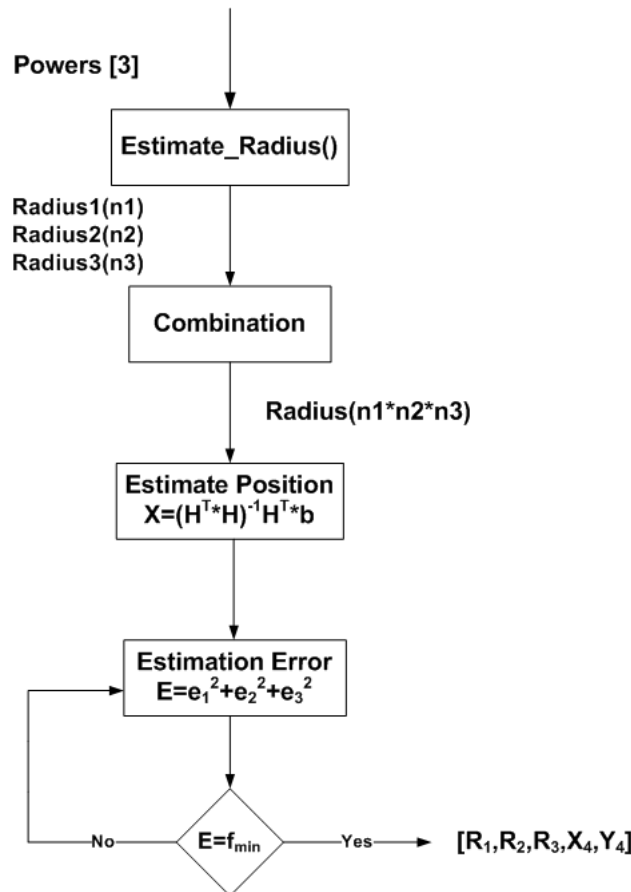


Figure 28: Fluxograma da rotina completa para estimação de localização.

### 4.2.3 Fontes de Erro em Estimação de Localização baseada em RSSI

As fontes de erro em estimação de localização baseada em RSSI estão divididas em três categorias principais: os erros relacionados ao *hardware*, os erros relacionados ao algoritmo de estimação de localização, e os erros relacionados aos efeitos do ambiente [25].

Ao transmissor é esperado transmitir um sinal com uma potência preespecificada. Entretanto, a construção de transceptores de baixo custo, para redes sem fio de curta distância normalmente tem apenas um simples mecanismo de controle de potência de saída, e a construção do *hardware* somente garante uma escala de potência de saída quando um conjunto de potência de saída é selecionado. As propriedades da antena podem também degradar a potência do sinal transmitido. Modelo de propagação da antena afeta a precisão na medição da potência do sinal no lado do receptor porque a quantidade de atenuação devido a antena dependerá do ângulo de chegada do sinal na



antena do receptor.

O receptor normalmente usa um mecanismo simples para aferir a potência do sinal recebido, e a diferença do valor atual em relação ao anterior, para aplicações estáticas, é um modo de avaliar o erro. A potência do sinal recebido é quantizada para formar o RSSI, e esta quantização será uma fonte inevitável de erro para qualquer método de estimação de localização baseado em RSSI.

O próprio algoritmo de localização poderá contribuir como fonte de erro em estimação de localização. Por exemplo, um algoritmo de otimização pode convergir para um mínimo local em vez de um mínimo global. As operações envolvendo matrizes podem sofrer com a presença de matrizes não condicionadas.

O efeito do ambiente é normalmente o maior desafio nas fontes de erro de estimação de localização. O multipercorso pode afetar grandemente a potência do sinal recebido. A mobilidade do nó rastreável causa uma mudança dinâmica no desvanecimento do canal e o torna mais desafiante para compensar tal efeito. Métodos de suavização do multipercorso assim como diversidade de antenas e métodos de estimação do canal podem ser usados para ajudar a reduzir erros devidos a desvanecimento do canal. O espalhamento do sinal em geral (DSSS - *Direct Sequence Spread Spectrum*) pode também reduzir erro de multipercorso induzido em alguns ambientes.

Aumentando o período de medição do RSSI ou repetindo a medida múltiplas vezes, podemos reduzir o erro em algumas aplicações a um custo do aumento do atraso na rede e a degradação da taxa de atualização da localização.

Há dois métodos para estimação das características do canal: empírico e o teórico. Na aproximação empírica, um conjunto de medições de potência do sinal é realizada em diferentes localizações. Estes dados medidos são usados para criar um modelo de canal que inclui o efeito do desvanecimento. Pela repetição da medida do RSSI em uma localização fixa, é possível criar um histograma de valores de RSSI, o qual pode ser usado para estimar um modelo estatístico do canal.

Na aproximação teórica, a informação disponível relativa ao ambiente *indoor/outdoor* que não requer qualquer medição é usada para modelar as características esperadas do canal. O método do raio traçado é um método que usa o plano do chão pra ambientes *indoor/outdoor*, o coeficiente de reflexão dos materiais presentes no ambiente, e outras informações que são disponíveis sem nenhum outro monitoramento do ambiente para

compor um modelo matemático para o canal. A vantagem de uma aproximação teórica é que não existe a necessidade de um trabalho intensivo de levantamento das medidas de RSSI no ambiente. Já o método empírico, quando bem realizado, tem a capacidade e aumentar a precisão do modelo além do que o modelo teórico pode oferecer.

## 5 *Resultados*

Os testes realizados objetivavam o levantamento de um conjunto de dados para a realização de dois procedimentos principais: a caracterização do meio no qual o sistema é implementado, e a verificação da viabilidade da implementação de um sistema de localização baseado em redes de sensores sem fio. Os resultados para o procedimento experimental estão divididos em dois grupos, os resultados referentes ao processo de modelagem do sinal de propagação sem fio e os resultados referentes ao processo de estimação de localização baseado no algoritmo de triangulação. Tais resultados fornecem uma base confiável para a implementação de rotinas de modelagem e algoritmos de estimação de localização.

### 5.1 Modelo de propagação sem fio - Resultados

O primeiro teste realizado, assim como o procedimento para o estudo de caso da seção 3.3, foi para comparação do modelo físico com os dados obtidos por meio do experimento que resultou no conjunto de dados “B”, os parâmetros do modelo usados nessa comparação, seguem as recomendações do ITU-R, ou seja, para uma frequência de comunicação de 2,4 GHz e um solo mediantemente umido, temos,  $\varepsilon_R = 20$  e  $\sigma = 0,6$  S/m, foi usado também, um desvio padrão do solo de  $s = 3$  cm. Tal comparação, observada na Figura 29, possui um erro rms de  $e = 8,5544$ .

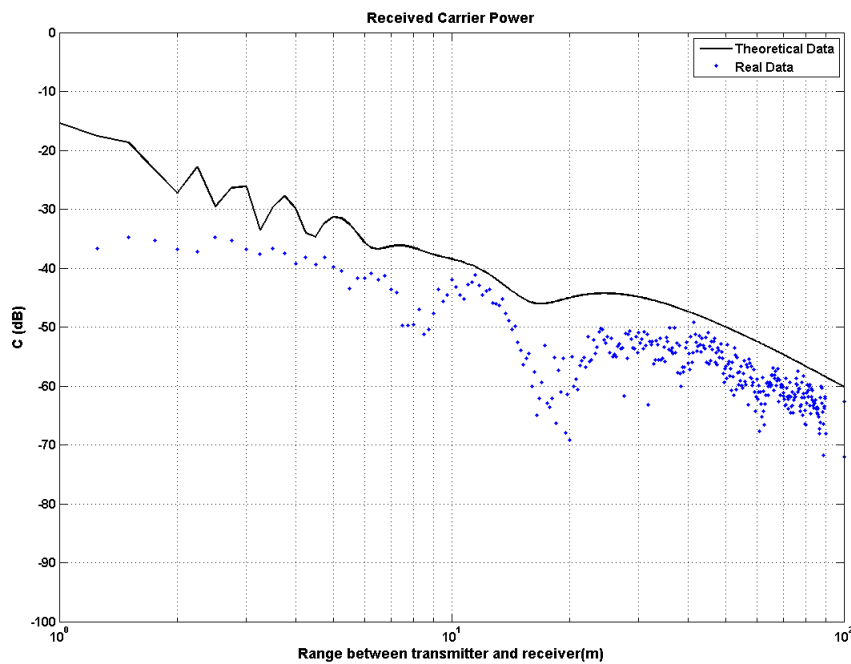


Figure 29: Comparação entre os dados obtidos e o modelo Físico seguindo as recomendações do ITU-R ( $\epsilon_R = 20$  e  $\sigma = 0,6$  S/m)

O mesmo procedimento de comparação e minimização de erro realizado no estudo de caso da seção 3.3, foi aplicado ao conjunto de dados obtidos a partir dos testes realizados no complexo poli-esportivo da UFCG. Devido a discrepância entre o modelo e os valores reais, foi aplicado ao modelo físico o *off-set* de potência ( $C$  (dBm)), de modo a minimizar erros devidos principalmente ao VSWR (*voltage standing wave ratio*) de ambas as antenas (receptor e transmissor) e possíveis diferenças de hardware relevantes ao ganho de saída do dispositivo. Deixando como constantes, os parâmetros de especificação dos módulos (Pt,Pr,Gt,Gr) e o desvio padrão do solo (3 cm) e os parâmetros recomendados pelo ITU-R  $\epsilon_R = 20$  e  $\sigma = 0,6$  S/m. A rotina de minimização de erro onde a variável para minimização é o *off-set* de potência, nos dá como resultado o seguinte valor de *off-set*:  $C = -7,5851$  dB, de modo que podemos observar na Figura 30 uma sensível melhora no processo de casamento dos dados, teórico e medido, refletido num erro rms de  $e = 3,9552$ .

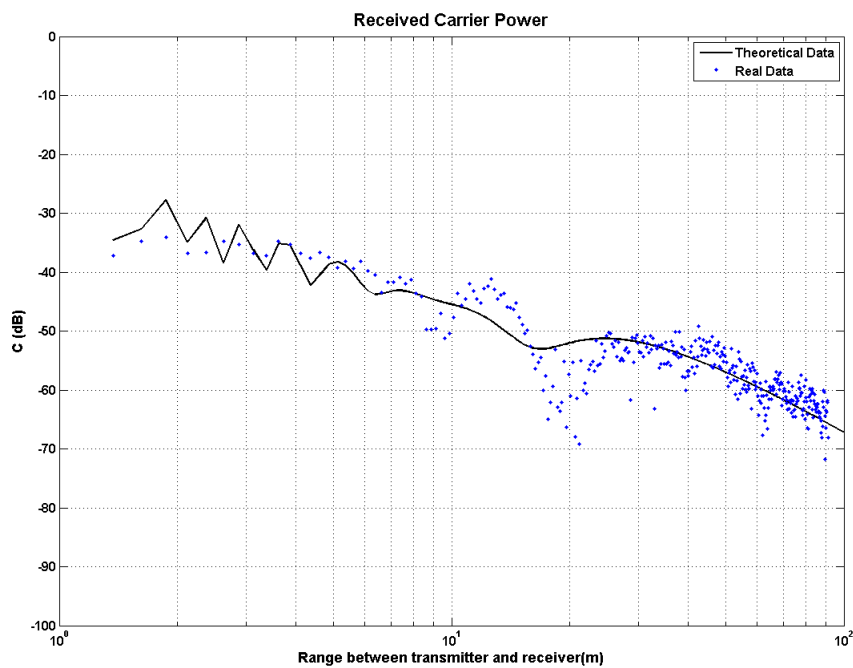


Figure 30: Comparação entre os dados obtidos e o modelo Físico seguindo as recomendações do ITU-R com a adição do *off-set* de correção ( $\varepsilon_R = 20$  e  $\sigma = 0,6$ )

Otimizando os parâmetros eletricos inerentes ao meio, pode-se reduzir ainda mais o erro. Este procedimento muda a forma da curva permitindo que as características devido a reflexão do sinal do solo sejam alteradas de modo que o modelo melhor se adequa ao conjunto de dados. Na Figura 23 podemos observar um modelo com os parâmetros eletricos otimizados em  $\varepsilon_R = 1,0337$  e  $\sigma = -0,9794$  S/m. O erro rms após tal otimização de parâmetros foi reduzido para  $e = 3,4492$  (Figura 31).

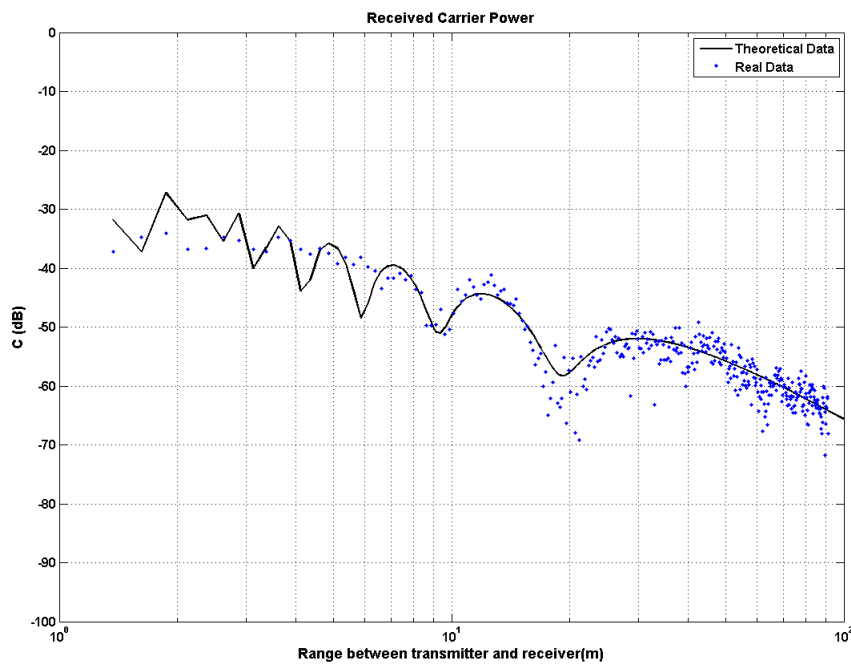


Figure 31: Comparação entre os dados obtidos e o modelo Físico com a adição dos *off-sets* de correção e a otimização dos parâmetros elétricos do meio ( $\varepsilon_R = 1,0337$  e  $\sigma = -0,9794$  S/m) .

## 5.2 Algoritmo de Estimação de Localização - Resultados

Como descrito na seção 3.1, foram obtidos dois conjuntos de dados, os quais são aplicados a diferentes finalidades, o conjunto de dados “A” foi aplicado ao algoritmo de estimação de localização de modo que se possa observar a eficácia deste trabalho usando redes locais com o protocolo de comunicação IEEE 802.15.4. Tal conjunto de dados engloba medições referentes a 6 pontos presentes no terreno descrito na Figura 13 da seção 3.1. Os pontos podem ser melhor observados na Figura 32.

Table 5: Posicionamento real dos nós.

Nó	X Real (m)	Y Real (m)
Nó Âncora 1	0	0
Nó Âncora 2	45	56
Nó Âncora 3	90	0
Ponto 1	0	56
Ponto 2	45	0
Ponto 3	33	0
Ponto 4	57	0
Ponto 5	45	12
Ponto 6	90	56

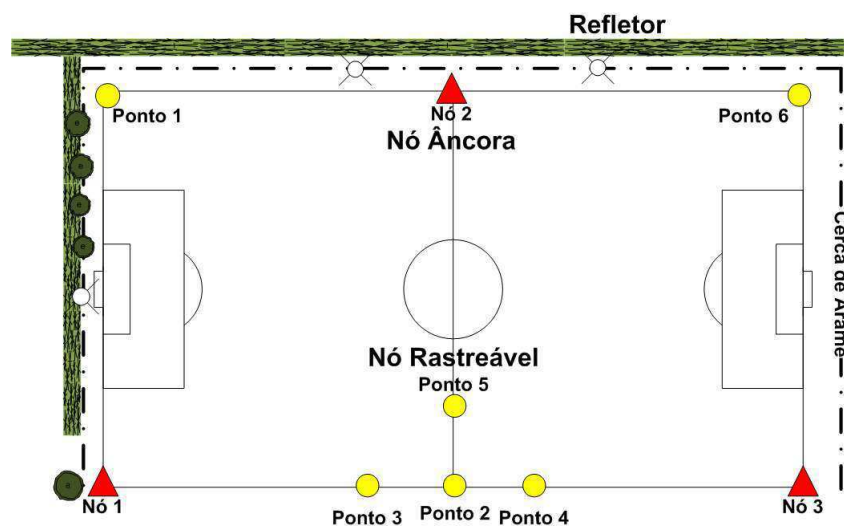


Figure 32: Diagrama da área de medição para obtenção do conjunto “A” de medições.

Para cada Ponto foi estimada uma localização utilizando os algoritmos, de modo que pudesse ser estimada com o menor erro possível a posição do nó rastreável para cada posição real assumida. Objetivando atingir tal meta, foi utilizado o modelo de estimação de raios que apresentou o menor erro em relação ao conjunto de dados real mas que utiliza constantes referentes ao meio não físicas. As posições reais dos nós âncora e para cada teste de localização do nó rastreável pode ser observada na Tabela 5.

Foram realizados dois testes para levantamento do conjunto de dados “A”, o primeiro (A1) com a máxima potência de transmissão (18 dBm, ou seja, 1600 m em linha de visão, segundo o fabricante do módulo de comunicação) e o segundo (A2) com a mínima (10 dBm, ou seja, aproximadamente 300 m de acordo com o processo de estimação de distância implementado, visto que o fabricante apenas fornece a máxima distância para

transmissão em linha de visão e em ambientes *outdoor*).

O resultados da estimação para para cada subconjunto podem ser observados nas Tabelas 6 e 7, respectivamente.

Table 6: Posição estimada dos pontos usando a maxima potência de transmissão.

Ponto	X Estimado	Y Estimado	Erro (m)
1	41,0420	39,0455	44,4061
2	40,3695	6,5239	8,0002
3	44,8025	2,8726	12,1471
4	42,3347	19,0308	24,0258
5	45,0794	9,4881	2,5131
6	91,0527	48,7325	7,5050

Ponto	R1 Real	R1 Estimado	Erro relativo (%)	R2 Real	R2 Estimado	Erro relativo (%)	R3 Real	R3 Estimado	Erro relativo (%)
1	56	56,06	0,10	45	15,39	65,8	106	62,09	41,42
2	45	14,35	68,11	56	31,67	43,44	45	32,24	28,35
3	33	13,02	60,54	57,3	31,25	45,46	57	14,32	53,82
4	57	30,93	45,73	57,3	13,27	76,84	33	37,90	14,84
5	46,6	14,82	68,19	44	16,15	63,29	46,6	14,33	69,24
6	106	98,40	7,17	45	35,13	21,93	56	37,90	32,32

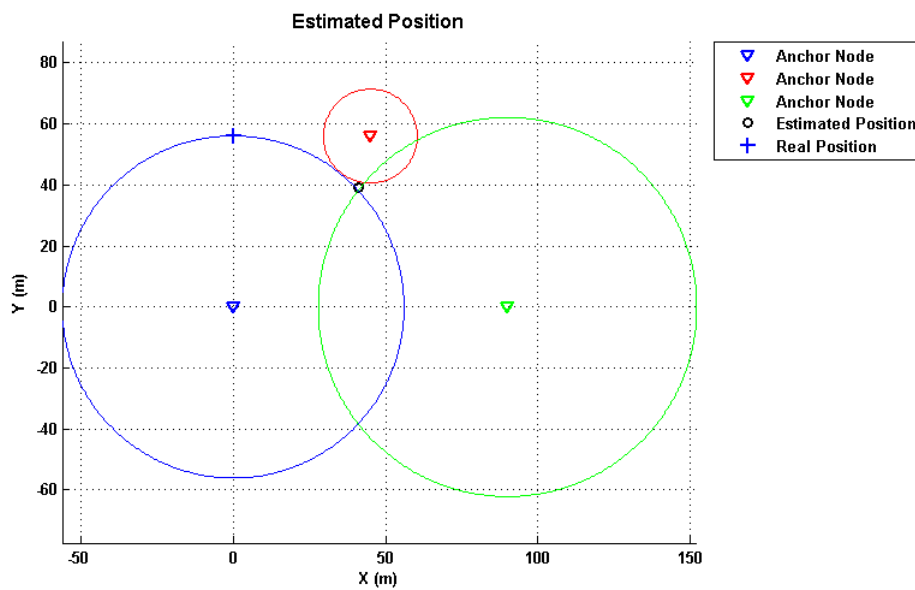


Table 7: Posição estimada dos pontos usando a mínima potência de transmissão.

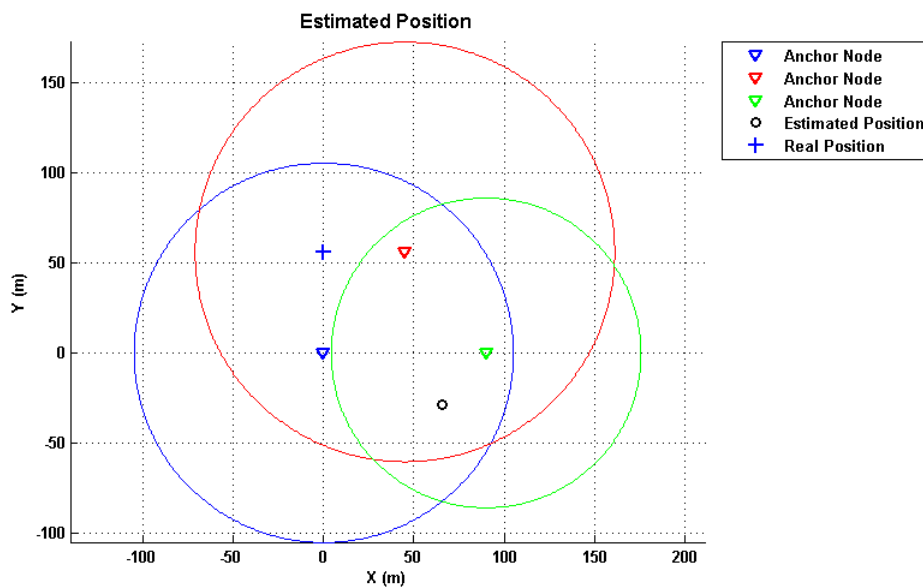
Ponto	X Estimado	Y Estimado	Erro (m)
1	65,4868	-28,7325	107,0894
2	44,0555	8,8608	8,9110
3	43,0780	6,3642	11,9193
4	45,2562	9,6547	15,2030
5	44,8188	9,7582	2,2491
6	35,3444	1,8046	76,9700

Ponto	R1 Real	R1 Estimado	Erro relativo (%)	R2 Real	R2 Estimado	Erro relativo (%)	R3 Real	R3 Estimado	Erro relativo (%)
1	56	105,14	87,75	45	116,36	158,58	106	85,83	19,03
2	45	65,77	46,16	56	67,30	20,18	45	67,05	49,00
3	33	63,95	93,79	57,3	68,27	19,14	57	66,60	16,84
4	57	66,06	15,89	57,3	66,11	15,38	33	65,71	99,12
5	46,6	43,89	5,82	44	44,28	0,64	46,6	44,26	5,02
6	106	14,35	86,46	45	44,54	1,02	56	44,09	21,27

Cada ponto referente a cada conjunto de dados (A1 e A2) foi comparado de modo a se observar qualitativamente a influência na estimação de distância de cada nó independente para as duas configurações de potência transmitida (Figuras 33, 34, 36, 36, 37 e 38).

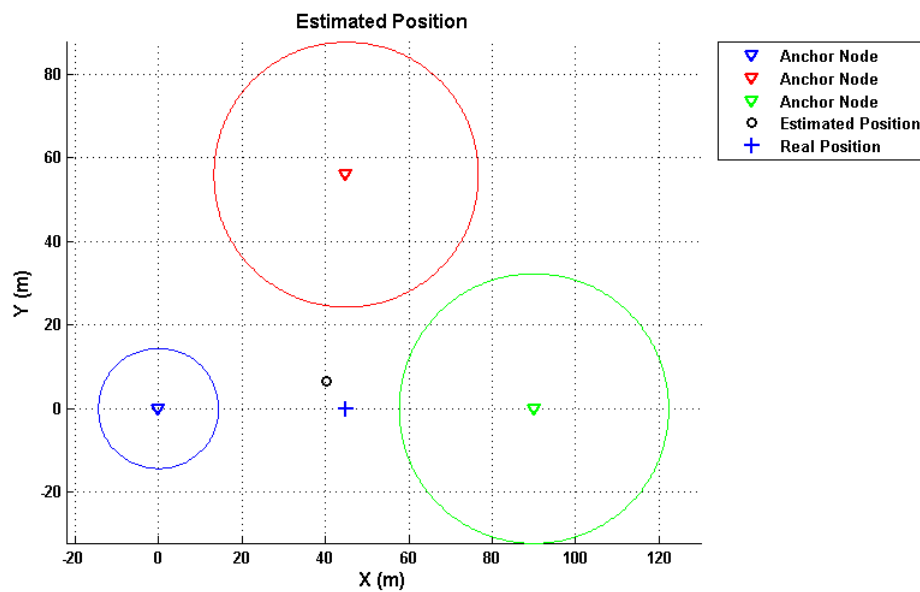


(a) Estimación de localização com a máxima potencia de transmissão.

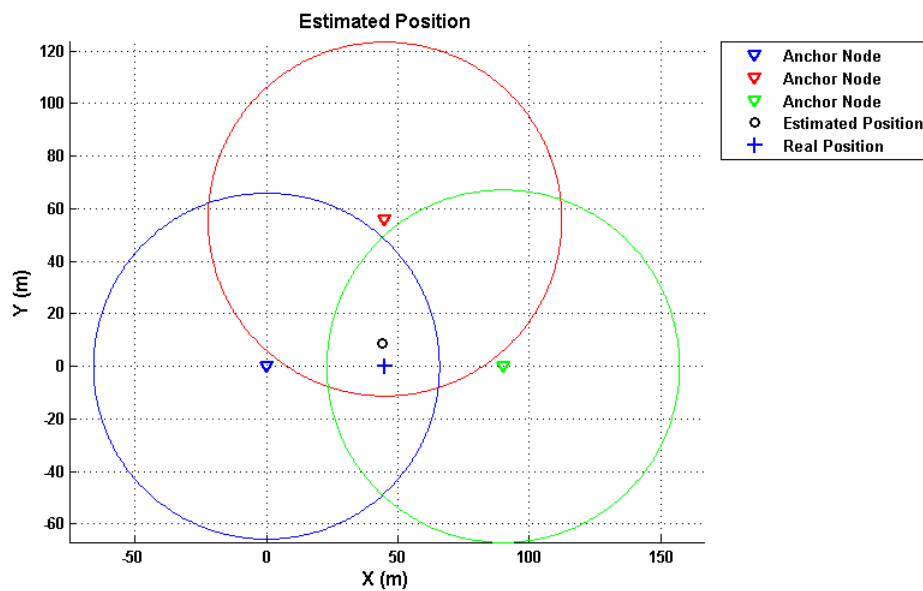


(b) Estimación de localização com a mínima potencia de transmissão.

Figure 33: Comparação dos resultados para o Ponto 1.

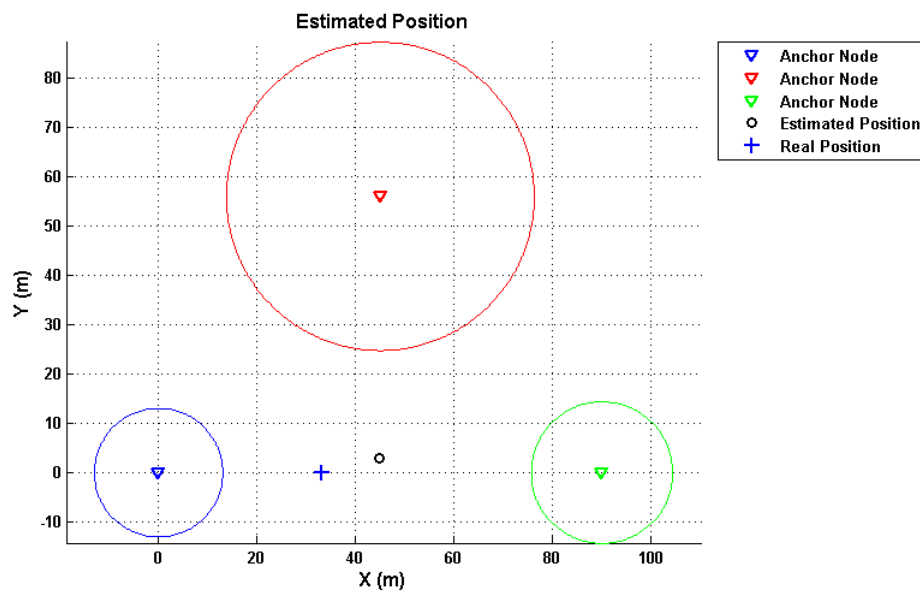


(a) Estimação de localização com a máxima potencia de transmissão.

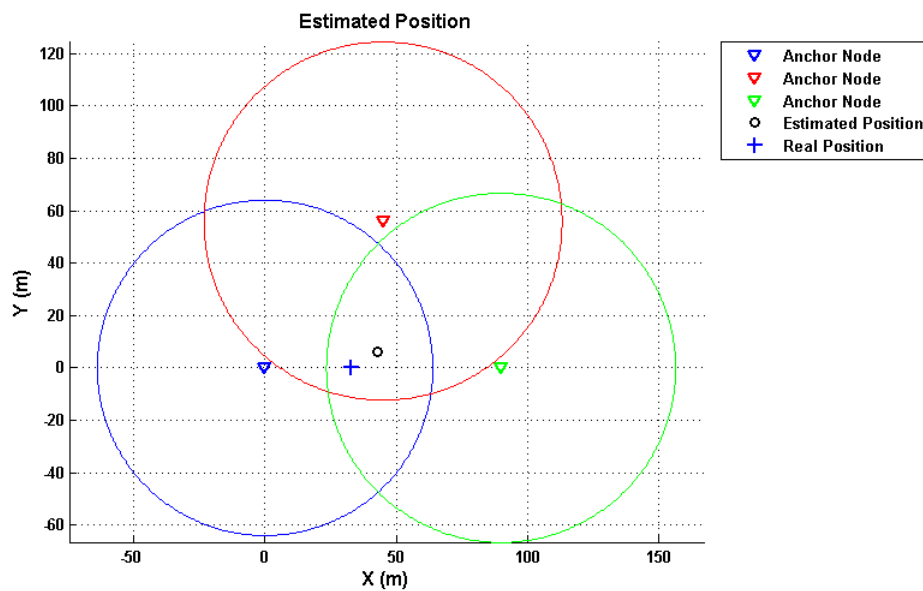


(b) Estimação de localização com a mínima potencia de transmissão.

Figure 34: Comparação dos resultados para o Ponto 2.

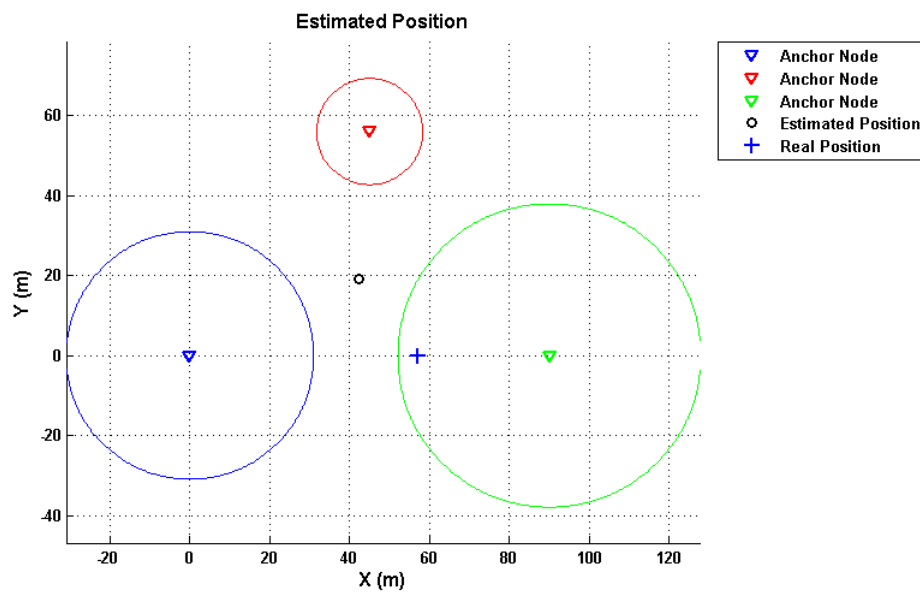


(a) Estimação de localização com a máxima potencia de transmissão.

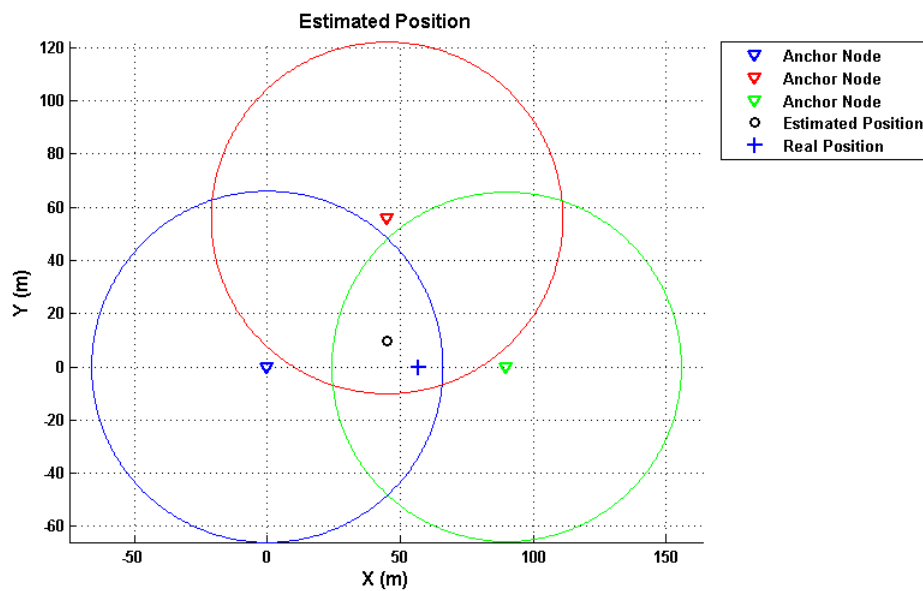


(b) Estimação de localização com a mínima potencia de transmissão.

Figure 35: Comparação dos resultados para o Ponto 3.

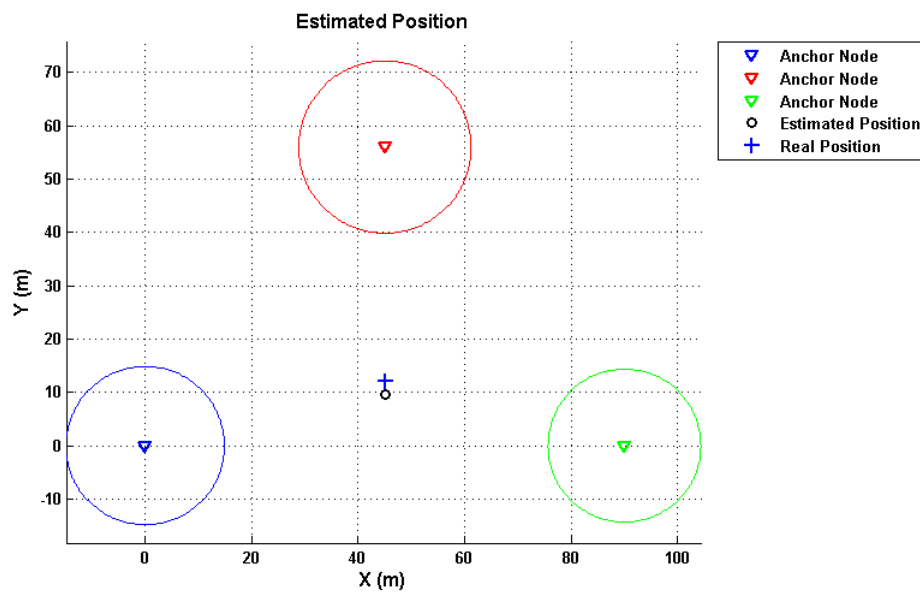


(a) Estimação de localização com a máxima potencia de transmissão.

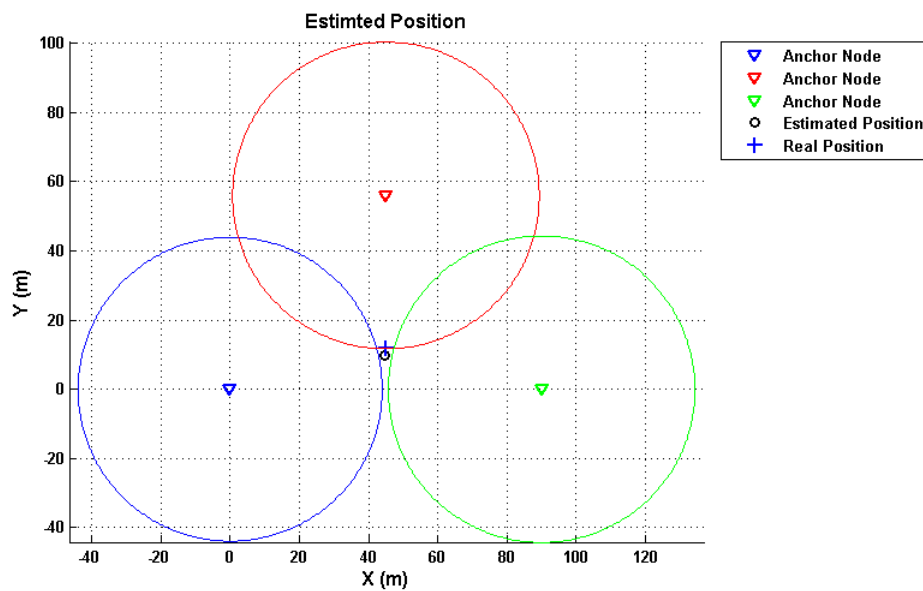


(b) Estimação de localização com a mínima potencia de transmissão.

Figure 36: Comparação dos resultados para o Ponto 4.

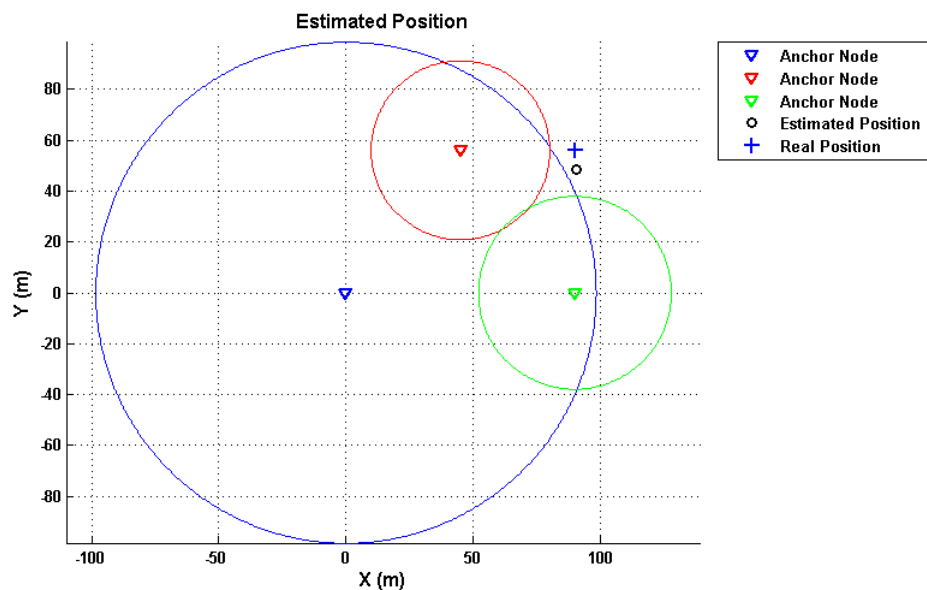


(a) Estimación de localización con a máxima potencia de transmisión.

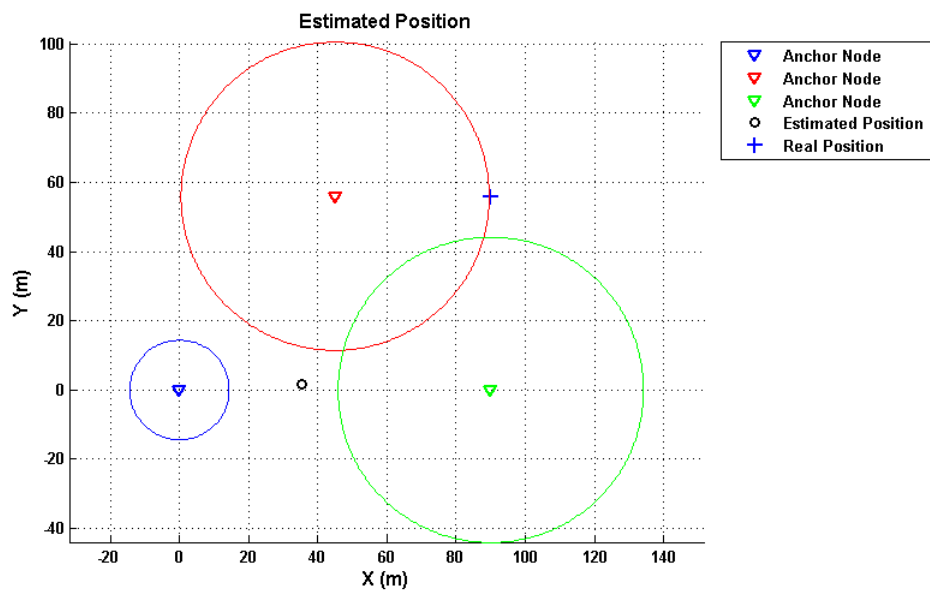


(b) Estimación de localización con a mínima potencia de transmisión.

Figure 37: Comparación de los resultados para el Punto 5.



(a) Estimação de localização com a máxima potencia de transmissão.



(b) Estimação de localização com a mínima potencia de transmissão.

Figure 38: Comparação dos resultados para o Ponto 6.

## 6 Conclusões

Foi realizado uma série de experimentos com objetivo de investigar a plausibilidade da estimação de localização usando redes de sensores sem fio baseados na tecnologia IEEE 802.15.4, para múltiplos nós receptores, a partir de um modelo de estimação de distância baseado no modelo de propagação dos dois raios.

O modelo de dois-raios simples parece refletir bem as características gerais das medições, mas um ajuste empírico dos parâmetros do modelo geralmente é requerido. É provável que um algoritmo de localização baseado no modelo de dois-raios precisará ser calibrado, então, para cada ambiente novo no qual é aplicado. Métodos de calibração automatizados ou semi-automatizados podem ser projetados, tornando o algoritmo de localização útil para uma gama de aplicações em uma variedade de ambientes.

O mesmo processo de caracterização aplicado ao estudo de caso de Patos, foi aplicado ao experimento realizado no complexo poliesportivo do *campus* I da UFCG. O primeiro resultado corresponde a simples aplicação dos parâmetros usados para o sistema de comunicação usando os parâmetros recomendados pelo ITU-R, porém como observado na Figura 29, claramente não representa a melhor modelagem para o conjunto de dados, gerando um erro rms de  $e = 8,5544$  dB. Tal erro foi minimizado utilizando um ajuste de *off-set* de potencia inserido posteriormente.

A inserção desse parâmetro de calibração empírica proporciona uma sensível melhora no processo de interpolação dos dados como observado na Figura 30, tal resultado nos fornece um erro rms de  $e = 3,9552$  dB. Ambos os resultados seguem um mesmo comportamento geral seguindo as normas propostas pelo ITU-R. Porém, como observado na Figura 31, podemos obter uma curva com o melhor resultado de interpolação a partir da não fixação dos parâmetros elétricos inerentes ao meio. Essa não fixação permite um melhor ajuste do modelo proposto ao conjunto de dados. A partir do uso de parâmetros elétricos otimizados ( $\epsilon_R = 1,0337$  e  $\sigma = -0,9794$  S/m) o erro rms foi reduzido para



$e = 3,4492$  dB, porém com a condição de não obtenção, necessariamente, de valores fisicamente plausíveis para aplicação do modelo ao meio.

Um ponto de especial interesse não deve ser esquecido. O processo de interpolação dos dados pela curva teórica é pobre dentro da região que compreende distâncias de até 2 metros, característica essa que pode ser explicada dado o tipo de antena usado nos módulos, antena tipo palito (monopólo). Esse tipo de antena possui a característica de transmitir o sinal uniformemente no plano horizontal, quando polarizada verticalmente, entretanto, possui um diagrama de distribuição lobular no eixo vertical, variando assim o nível de potência do sinal transmitido. Isto reduz a potência efetiva da onda refletida e diminui a precisão do processo de estimação de distância para alcances menores que 2 m.

Assim, pode-se concluir que dado o processo de estimação de distância, o procedimento de modelagem do ambiente pode resultar numa estimação razoável, porém com o uso de parâmetros que estão em desacordo com os recomendados pelo ITU-R. Esses parâmetros, após o processo de otimização, podem ser coerentes como no estudo de caso de Patos, que nos retornou um valor de permitividade relativa próximo do valor recomendado pelo ITU-R, mas com um valor de condutividade elétrica muito acima do recomendado. Esse fato pode ser explicado dado a presença do terceiro maior açude da Paraíba a uma distância de aproximadamente 50 m dos pontos de medição para caracterização do ambiente, o que aumenta a umidade do solo e conseqüentemente sua condutividade devido a dissolução dos sais presentes nesse.

Para o processo de estimação de localização foram realizados dois testes, nos quais a potência de transmissão dos módulos utilizados foi variada de forma a se verificar a influência de diferentes potências transmitidas para uma área de cobertura. Os dados referentes a máxima potência de transmissão revelam uma melhor precisão na localização para distâncias maiores entre os módulos envolvidos.

Para o caso do conjunto com a mínima potência transmitida a estimação de distâncias é realizada com um erro menor do que a primeira, fato esse devido a escala de estimação de distância ser da ordem da máxima distância que o módulo pode transmitir, ou seja, quanto menor a área para estimação de localização, menor deve ser a potência transmitida, de modo que a escala de estimação de distância seja da mesma ordem da área de cobertura dos módulos, reduzindo assim a distância na qual haverá uma maior influência da região de interferências construtivas e destrutivas.

Tomando por base os resultados, pode-se afirmar que um sistema de localização ba-

---

seado em redes de sensores sem fio é uma alternativa prática de baixo custo aos atuais sistemas baseados em GPS. Porém, deve-se observar que o sistema ainda é bastante susceptível as condições do ambiente ao qual será implementado.

## *Referências*

- [1] MAO, G.; FIDAN, B. *"Localization Algorithms and Strategies for Wireless Sensor Network"*. 1. ed. [S.l.]: Information Science Reference, 2009. (Premier Reference Sources, v. 1). ISBN 978-1-60566-396-8,978-1-60566-397-5.
- [2] CAFFERY J.J., S. G. Overview of radiolocation in cdma cellular systems. *Communications Magazine, IEEE*, v. 36, n. 4, p. 38 –45, Apr 1998. ISSN 0163-6804.
- [3] SAHINOGLU, S. G. Z.; GUVENC, I. *Ultra-wideband Positioning Systems: Theoretical Limits, Ranging, Algorithms, and Protocols*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2008. ISBN 978-0-521-87309-3.
- [4] HIGHTOWER J., B. G. Location systems for ubiquitous computing. *Computer*, v. 34, n. 8, p. 57 –66, Aug 2001. ISSN 0018-9162.
- [5] GUVENC, I. Enhancements to rss based indoor tracking systems using kalman filters. In: *In GSPx and International Signal Processing Conference*. [S.l.: s.n.], 2003.
- [6] BAHL P., P. V. Radar: an in-building rf-based user location and tracking system. In: . [S.l.: s.n.], 2000. v. 2, p. 775 –784 vol.2.
- [7] EREN, H. *Wireless Sensors and Instruments Networks, Design, and Applications*. [S.l.]: Taylor and Francis, 2005. ISBN 0849336740.
- [8] KAHN R. H. KATZ, K. S. P. J. M. *Emerging Challenges Mobile Networking for "Smart Dust"*. 1999.
- [9] JOHNSON, T. M. *Redes de Sensores Sem Fio (RSSF): Uso de Comunicação sem fio*. Abril 2008. [Http://www.wirelessbrasil.org/wirelessbr/colaboradores/thienne\\_johnson/rssf-intro.htm](http://www.wirelessbrasil.org/wirelessbr/colaboradores/thienne_johnson/rssf-intro.htm).
- [10] BAKKER, D.; GILSTER, D. M. *Bluetooth: End to End*. 1. ed. [S.l.]: M e T Books, 2002. ISBN 0-7645-4887-5.
- [11] LABIOD, H. A. H.; SANTIS, C. D. *Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee and WiMAX*. 1. ed. [S.l.]: Springer, 2007. ISBN 978-1-4020-5396-2.
- [12] GRATTON, D. A. *Developing Practical Wireless Applications*. 1. ed. [S.l.]: Elsevier, 2007. ISBN 978-1-55558-310-1.
- [13] MESSIAS, A. R. *Controle remoto e aquisição de dados via XBee/ZigBee (IEEE 802.15.4)*. Maio 2008. [Http://www.rogercom.com/ZigBee/ZigBee.htm](http://www.rogercom.com/ZigBee/ZigBee.htm).

- [14] IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - specific requirement Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). *IEEE Std 802.15.4a-2007 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2006)*, p. 1–203, 2007.
- [15] PINHEIRO, J. M. S. *As Redes com Zigbee*. Abril 2008. [Http://www.projetoderedes.com.br/artigos/artigo\\_zigbee.php](http://www.projetoderedes.com.br/artigos/artigo_zigbee.php).
- [16] EADY, F. *Go Wireless with the XBee*. Setembro 2006. Circuit Cellar, the Magazine for Computer Applications. Issue 194.
- [17] SEMICONDUCTOR, I. F. *802.15.4 MAC PHY Software*. Document number: 802154mpsr, rev. 1.6. Technical Information Center, CH370, 1300 N. Alma School Road, Chandler, Arizona 85224, Tel: +1-800-521-6274 or +1-480-768-2130, Jan 2008.
- [18] METEOROLOGIA, I. N. de. *Normais Climatológicas (1961-1990)*. [S.l.], 2009.
- [19] SILVA, R. S. B. Ademar Barros da; SOUZA, A. R. de. Caracterização do meio físico da microbacia quatro bocas, em angelim, pe, e sua quantificação por sistema de informação geográfica. *Pesq. agropec. bras.*, v. 34, n. 1, jan 1999. ISSN 0018-926X.
- [20] GLOVER, I.; GRANT, P. *Digital Communications*. 2. ed. [S.l.]: Pearson, 2004. ISBN 0-130-89399-4.
- [21] HECHT, E. *Optics*. [S.l.]: Pearson, 2002.
- [22] YAZDANDOOST, K.; KOHNO, R. The ultra-wideband signal propagation. In: *Circuits and Systems, 2004. MWSCAS '04. The 2004 47th Midwest Symposium on*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 2, p. II-645-II-648 vol.2.
- [23] NETO, J. M. et al. Propagation measurements and modeling for monitoring and tracking in animal husbandry applications. In: *International Instrumentation and Measurement Technology Conference*. , USA: [s.n.].
- [24] MALIK, W.; ALLEN, B. Wireless sensor positioning with ultrawideband fingerprinting. In: *Antennas and Propagation, 2006. EuCAP 2006. First European Conference on*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1–5.
- [25] FARAHANI, S. *ZigBee Wireless Network and Transceivers*. 1. ed. 30 corporate drive, suite 400, burlington, MA 01803, USA: Newnes, 2008. ISBN 978-0-7506-8393-7.
- [26] AAMODT, K. *Application Note AN042 (Rev. 1.0) SWRA095*. 10 2006.
- [27] SEIDEL, S.; RAPPAPORT, T. 914 mhz path loss prediction models for indoor wireless communications in multifloored buildings. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, v. 40, n. 2, p. 207–217, Feb 1992. ISSN 0018-926X.
- [28] RAPPAPORT, T. S. *Wireless Communications: Principles and Practice*. Second edition. [S.l.]: Prentice Hall, 2002. ISBN 0-13-042232-0.

- 
- [29] KIM, D.; INGRAM, M.; SMITH W.W., J. Measurements of small-scale fading and path loss for long range rf tags. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, v. 51, n. 8, p. 1740–1749, Aug. 2003. ISSN 0018-926X.
- [30] KYPEROUNTAS, S. *Practical Considerations of Localization in ZigBee Networks*. June 2006. ZigBee Developers Conference.